

NIEL NASCIMENTO TEIXEIRA

DETECÇÃO E ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL UTILIZANDO O SISTEMA NAVSTAR-GPS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira

CURITIBA

2001

**“DETECÇÃO E ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL
UTILIZANDO O SISTEMA NAVSTAR-GPS”**

POR

NIEL NASCIMENTO TEIXEIRA

Dissertação nº 157 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 24 de outubro de 2001.



Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira (UFPR)
Orientador e Presidente



Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo - Membro (UNESP)



Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal – Membro (UFPR)

DEDICATÓRIA

"E no demais, atenta para isto: Não há limites para escrever livros...."

Salomão, Rei de Israel, 977 a. C., Eclesiastes 12:12.

É com muita satisfação que dedico este trabalho,

À Deus, Criador e Senhor do Universo.
Aos meus pais, Niel I. Teixeira e Maria
Nildete N. Teixeira.

Aos meus irmãos, Ruth (Valdemon e
Natália), Sóstenes, Débora (Welligton),
Rubens e Paulo Dã.

À Débora Oliveira dos Santos, minha
namorada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira, pela sugestão do tema desta dissertação, pela atitude profissional e amigável, bem como, pelos esforços que nunca mediu para orientar-me neste trabalho.

À COPEL, na pessoa da Engenheira Cartógrafa Cristina Dzeprailidis, pela liberação da ocupação de sua Rede Geodésica GPS para a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Civil e, também, mestrando do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Jaime Freiburger Júnior, pelo auxílio nos levantamentos de campo, bem como no processamento dos dados GPS.

Aos bolsistas do Laboratório de Geodésia Espacial, Maurício Sejas, Samantha Moraes e Vivian Fernandes, pelo apoio e esclarecimentos iniciais relativos ao programa PRISM e operação do receptor ASHTECH Z-12.

Ao Dr. Carlito Vieira de Moraes, pela contribuição e esclarecimentos nas questões relevantes deste trabalho.

À Leonel Schoch, Mírian Schoch e família, pelo apoio em todos os momentos.

Às instituições de ensino, EMARC-Ur/BA e FEAMIG/MG, que contribuíram de forma relevante no meu aprimoramento profissional.

Aos profissionais da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, o benefício da bolsa de estudos.

A Universidade Federal do Paraná, por meio do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (C.P.G.C.G), pelo fornecimento de equipamentos e programas necessários à realização deste trabalho, bem como, pela contribuição aos conhecimentos adquiridos, por meio dos profissionais de excelente gabarito que a compõem.

Aos amigos e professores do C.P.G.C.G, pelo apoio e contribuição para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE PRINCIPAIS SIGLAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE GRÁFICOS	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O TEMA: DEFINIÇÃO, DELIMITAÇÃO E IMPORTÂNCIA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 JUSTIFICATIVA.....	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO	6
2.1 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS).....	6
2.1.1 Modernização do GPS.....	9
2.1.1.1 Segmento de controle.....	9
2.1.1.2 Segmento espacial.....	9
2.1.2 Métodos de Posicionamento GPS.....	10
2.1.2.1 Técnica estática.....	11
2.1.3 Fontes de Erros no Posicionamento.....	11
2.1.4 Combinações Lineares de Observações.....	17
2.2 AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS....	17
2.3 TESTE GLOBAL E TESTE DATA SNOOPING.....	18
2.3.1 Teste Global.....	18
2.3.2 Teste Data Snooping.....	19
2.4 ANÁLISE DE QUALIDADE DE REDE GEODÉSICA.....	21
2.4.1 Medidas de Precisão.....	21
2.4.1.1 Semi-eixos da elipse de erro.....	24
2.4.1.2 Análise da primeira componente principal nos planos horizontal (X,Y) e no eixo (Z).....	25
2.4.1.3 Precisão de coordenada isolada.....	27
2.4.1.4 Precisão de posição.....	27
2.4.2 Medidas de Confiabilidade.....	28
2.4.2.1 Confiabilidade interna.....	28
2.4.2.2 Confiabilidade externa.....	32
2.4.3 Medida de Sensibilidade.....	32
2.4.3.1 Estimativa dos Deslocamentos.....	35
3 LEVANTAMENTO DE CAMPO	38
3.1 PLANEJAMENTO.....	42
3.2 METODOLOGIA DE CAMPO.....	43
3.2.1 Equipamentos Utilizados.....	43
3.2.2 Técnica de Levantamento.....	43
3.2.3 Procedimentos para Simulação dos Deslocamentos Verticais.....	46
4 PROCESSAMENTO E AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES	49
4.1 PROGRAMA UTILIZADO.....	49
4.1.2 Processamento Utilizando o PRISM.....	49

4.1.2.1	Combinações lineares entre fases.....	50
4.1.2.1.1	Combinação linear wide lane.....	50
4.1.2.1.2	Combinação linear narrow lane.....	50
4.1.2.1.3	Combinação linear livre do atraso ionosférico.....	51
4.1.3	Análise dos Resíduos da Dupla Diferença de Fase da Portadora.....	51
4.1.4	Desvios Padrão das Coordenadas X, Y, Z.....	54
4.2	AJUSTAMENTO DAS COMPONENTES (ΔX, ΔY, ΔZ) OBTIDAS NOS PROCESSAMENTOS DAS LINHAS DE BASE.....	57
4.2.1	Modelo Matemático.....	58
5	ANÁLISE DOS AJUSTAMENTOS E DA PRECISÃO DA REDE.....	67
5.1	ANÁLISE DOS AJUSTAMENTOS DAS LINHAS DE BASE.....	67
5.2	ANÁLISE DO CRITÉRIO DE PRECISÃO DA REDE.....	68
6	TESTES ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE ERROS E DESLOCAMENTOS E ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL.....	73
6.1	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	73
6.1.1	Análise do Teste Global.....	73
6.1.2	Análise do Teste Data Snooping.....	76
6.1.3	Análise da Confiabilidade.....	79
6.1.3.1	Confiabilidade interna.....	79
6.1.3.2	Confiabilidade externa.....	84
6.1.3.3	Análise das Estações Rejeitadas no Teste de Confiabilidade.....	85
6.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DESLOCAMENTOS.....	87
6.3	ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL.....	93
6.3.1	Análise de Deslocamento Vertical das Estações Aprovadas nos Testes Estatísticos.....	94
6.3.2	Análise de Deslocamento Vertical nas Estações BGI e CIC.....	98
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	102
7.1	CONCLUSÃO.....	102
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	104
	REFERÊNCIAS.....	105
	DOCUMENTOS CONSULTADOS.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS

- 1 $N_i^j \rightarrow$ ambigüidade
- 2 $\theta \rightarrow$ ângulo de inclinação da elipse em relação ao plano cartesiano (X, Y)
- 3 $R \rightarrow$ característica de uma matriz
- 4 $Y \rightarrow$ componente principal
- 5 $X_f, Y_f, Z_f \rightarrow$ coordenadas das estações base
- 6 $X_{r_i}, Y_{r_i}, Z_{r_i} \rightarrow$ coordenadas das estações relativas
- 7 $X_{r_i}^a, Y_{r_i}^a, Z_{r_i}^a \rightarrow$ coordenadas ajustadas das estações relativas
- 8 $d_i \rightarrow$ deslocamento estimado
- 9 $d_0 \rightarrow$ deslocamento mínimo detectável
- 10 $\sigma \rightarrow$ desvio padrão
- 11 $\bar{\sigma}_0 \rightarrow$ desvio padrão a posteriori único entre as observações
- 12 $m_{di} \rightarrow$ dimensão do vetor correspondente ao deslocamento analisado
- 13 $R_i^j \rightarrow$ distância geométrica entre o satélite e o receptor
- 14 $F \rightarrow$ distribuição F de Snedecor
- 15 $N \rightarrow$ distribuição normal
- 16 $\chi^2 \rightarrow$ distribuição qui - quadrado
- 17 $N_{ik}^{ij} \rightarrow$ dupla diferença de ambigüidade
- 18 $R_{ik}^{ij} \rightarrow$ dupla diferença de distância geométrica
- 19 $\nabla \Delta PR_{ik}^{ij} \rightarrow$ dupla diferença de fase
- 20 $\nabla \Delta \xi_{ik}^{ij} \rightarrow$ dupla diferença dos demais erros existentes
- 21 $q_{di} \rightarrow$ elemento da matriz cofatora correspondente ao deslocamento analisado
- 22 $c\delta t_i \rightarrow$ erro do sincronismo do relógio do receptor
- 23 $c\delta t^i \rightarrow$ erro do sincronismo do relógio do satélite
- 24 $\nabla l_{0i} \rightarrow$ erro mínimo detectável

- 25 $\nabla l_i \rightarrow$ erro significativo
- 26 $E \rightarrow$ esperança matemática
- 27 $F_A \rightarrow$ estatística aplicada à hipótese alternativa
- 28 $F_0 \rightarrow$ estatística aplicada à hipótese nula
- 29 $\chi^2 \rightarrow$ estatística qui - quadrado
- 30 $a \rightarrow$ fator de escala
- 31 $a_{\min} \rightarrow$ fator de escala mínimo
- 32 $\theta_{(\beta_0)}^{-1} \rightarrow$ função de probabilidade inversa da distribuição normal reduzida
- 33 $W \rightarrow$ graus de liberdade
- 34 $W_2 \rightarrow$ graus de liberdade do denominador
- 35 $W_1 \rightarrow$ graus de liberdade do numerador
- 36 $H_a \rightarrow$ hipótese alternativa
- 37 $H_0 \rightarrow$ hipótese nula
- 38 $Q_d \rightarrow$ matriz cofatora dos deslocamentos estimados
- 39 $Q_v \rightarrow$ matriz cofatora dos resíduos
- 40 $A \rightarrow$ matriz das derivadas parciais das equações de observação em relação aos parâmetros ajustados
- 41 $\Lambda \rightarrow$ matriz diagonal dos valores próprios
- 42 $N \rightarrow$ matriz dos coeficientes das incógnitas das equações normais
- 43 $P \rightarrow$ matriz dos pesos das observações
- 44 $P_d \rightarrow$ matriz dos pesos das observações única entre duas campanhas
- 45 $S \rightarrow$ matriz dos vetores próprios
- 46 $B \rightarrow$ matriz modelo de deslocamento
- 47 $\sum_{La} \rightarrow$ matriz variância - covariância das observações ajustadas
- 48 $\sum_{Lb} \rightarrow$ matriz variância - covariância das observações medidas
- 49 $\sum_d \rightarrow$ matriz variância - covariância dos deslocamentos estimados
- 50 $\sum_{xa} \rightarrow$ matriz variância - covariância dos parâmetros ajustados

- 51 $\sum v \rightarrow$ matriz variância - covariância dos resíduos
- 52 $(1 - \alpha) \rightarrow$ nível de confiança
- 53 $\alpha \rightarrow$ nível de significância
- 54 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z \rightarrow$ observações do GPS
- 55 $\Delta_{xi}, \Delta_{yi}, \Delta_{zi} \rightarrow$ observações GPS das estações relativas
- 56 $\Delta_{xi}^a, \Delta_{yi}^a, \Delta_{zi}^a \rightarrow$ observações GPS ajustadas das estações relativas
- 57 $l_i^b \rightarrow$ observação medida
- 58 $L_1, L_2, P, C/A \rightarrow$ observáveis emitidas pelo sinal GPS
- 59 $(1 - \beta_0) \rightarrow$ poder de teste
- 60 $r_i \rightarrow$ redundância parcial
- 61 $\omega_i \rightarrow$ resíduo padronizado
- 62 $a_1 \rightarrow$ semi - eixo maior da elipse
- 63 $a_2 \rightarrow$ semi - eixo menor da elipse
- 64 $N_{ik}^j \rightarrow$ simples diferença de ambigüidade
- 65 $Z_{\frac{\alpha}{2}} \rightarrow$ valor crítico que indica um dos limites do intervalo de confiança $(1 - \alpha)$
- 66 $\chi^2 \rightarrow$ valor estatístico extraído da tabela da distribuição qui - quadrado
- 67 $\lambda^* \rightarrow$ valor próprio
- 68 $\lambda_{\max}^* \rightarrow$ valor próprio máximo
- 69 $\lambda_{\min}^* \rightarrow$ valor próprio mínimo
- 70 $\sigma \rightarrow$ variância
- 71 $\hat{\sigma}_0^2 \rightarrow$ variância a posteriori
- 72 $\bar{\sigma}_0^2 \rightarrow$ variância a posteriori única entre as campanhas
- 73 $\sigma_0^2 \rightarrow$ variância a priori
- 74 $\sigma_{di}^2 \rightarrow$ variância do deslocamento estimado
- 75 $\sigma_{vi}^2 \rightarrow$ variância do resíduo

- 76 $\hat{\sigma}_1^2$ e $\hat{\sigma}_2^2 \rightarrow$ variâncias a posteriori referentes a primeira e a segunda campanhas
- 77 $X^a \rightarrow$ vetor das coordenadas ajustadas
- 78 $d_{obs} \rightarrow$ vetor das diferenças das observações ajustadas entre as duas campanhas analisadas
- 79 $I^a \rightarrow$ vetor das observações ajustadas
- 80 $I^b \rightarrow$ vetor das observações medidas
- 81 $I^0 \rightarrow$ vetor das observações aproximadas
- 82 $\nabla x \rightarrow$ vetor de medidas de confiabilidade externa
- 83 $\nabla I_0 \rightarrow$ vetor de medidas de confiabilidade interna
- 84 $d \rightarrow$ vetor dos deslocamentos estimados
- 85 $\nabla I \rightarrow$ vetor dos erros significativos
- 86 $X^0 \rightarrow$ vetor dos parâmetros aproximados
- 87 $V \rightarrow$ vetor dos resíduos

LISTA DAS PRINCIPAIS SIGLAS

- 1 DDF – Dupla Diferença de Fase
- 2 GPS – Global Positioning System
- 3 LAGE – Laboratório de Geodésia Espacial
- 4 NAVSTAR-GPS - Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System
- 5 RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
- 6 SDF – Simples Diferença de Fase
- 7 TDF – Tripla Diferença de Fase
- 8 UFPR – Universidade Federal do Paraná
- 9 COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica
- 10 NIMA – National Imagery Agency
- 11 SD - Selective Denial

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - CONSTELAÇÃO DOS SATÉLITES GPS.....	7
FIGURA 2.2 - DISPOSIÇÃO DO SEGMENTO DE CONTROLE.....	8
FIGURA 2.3 - ESTRUTURA DOS SINAIS GPS APÓS A MODERNIZAÇÃO.....	10
FIGURA 2.4 - PRECISÃO E CORREÇÃO COMO CRITÉRIO DE ACURÁCIA..	22
FIGURA 2.5 - ELIPSE DE ERROS.....	24
FIGURA 2.6 - ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE PRINCIPAL NO (X,Y).....	26
FIGURA 2.7 - ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE PRINCIPAL NO EIXO (Z).....	26
FIGURA 2.8 - DISTRIBUIÇÃO F CENTRAL, NÃO CENTRAL E PARÂMETRO DE NÃO-CENTRALIDADE.....	30
FIGURA 3.1 - REDE GEODÉSICA GPS/COPEL.....	38
FIGURA 3.2 - ESTAÇÃO BGI.....	41
FIGURA 3.3 - ESTAÇÃO UBR.....	41
FIGURA 3.4 - ESTAÇÃO PHO.....	41
FIGURA 3.5 - ESTAÇÃO PIL.....	41
FIGURA 3.6 - ESTAÇÃO BTA.....	41
FIGURA 3.7 - ESTAÇÃO CRCB.....	41
FIGURA 3.8 - DISPOSITIVO "BASE PARA DEFORMAÇÕES".....	42
FIGURA 3.9 - DESLOCAMENTO VERTICAL IMPOSTO NAS ESTAÇÕES RELATIVAS.....	48
FIGURA 4.1 - VETOR DE POSIÇÃO GERADOS EM UMA ESTAÇÃO RELATIVA EM FUNÇÃO DE DUAS ESTAÇÕES BASE.....	59
FIGURA 5.1 - ELIPSES DE ERROS DAS COMPONENTES (X,Y) / 1ª ÉPOCA.....	69
FIGURA 5.2 - ELIPSES DE ERROS DAS COMPONENTES (X,Y) / 2ª ÉPOCA.....	70
FIGURA 5.3 - VETORES DE ERROS DA COMPONENTE (Z) / 1ª ÉPOCA.....	71
FIGURA 5.4 - VETORES DE ERROS DA COMPONENTE (Z) / 2ª ÉPOCA.....	72
FIGURA 6.1 - ELIPSES DE SENSIBILIDADE E DE ERROS DOS DESLOCAMENTOS EM (X,Y) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS....	92
FIGURA 6.2 - VETORES DE SENSIBILIDADE E DE DESLOCAMENTOS EM (Z) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS.....	93
FIGURA 6.3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA OS DESLOCAMENTOS REAL E GPS.....	96
FIGURA 6.4 - VARIAÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO MÉDIO DAS LINHAS DE BASE.....	98
FIGURA 6.5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DESLOCAMENTOS REAL E GPS NAS ESTAÇÕES BGI E CIC.....	100
FIGURA 6.6 - VARIAÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DAS LINHAS DE BASE.....	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	EFEITOS DOS ERROS ORBITAIS NAS LINHAS DE BASE...	13
TABELA 2.2 -	CONTROLE DE OBSERVAÇÕES POR MEIO DE REDUNDÂNCIAS PARCIAIS.....	29
TABELA 2.3 -	PARÂMETRO DE NÃO-CENTRALIDADE EM FUNÇÃO DO PODER DE TESTE ($1-\beta_0$) E NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (α_0).	30
TABELA 3.1 -	DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DA REDE GEODÉSICA GPS/COPEL.....	39
TABELA 3.2 -	LOCAIS DE MATERIALIZAÇÃO DOS MARCOS DA REDE GEODÉSICA GPS/COPEL.....	40
TABELA 3.3 -	PERÍODO DE OCUPAÇÃO EM CADA ESTAÇÃO.....	44
TABELA 3.4 -	DURAÇÃO DE RASTREIO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE.....	44
TABELA 3.5 -	COMPRIMENTO DAS LINHAS DE BASE.....	45
TABELA 3.6 -	COORDENADAS CARTESIANAS E GEODÉSICAS DAS ESTAÇÕES BASE.....	46
TABELA 4.1 -	COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES RELATIVAS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (1ª ÉPOCA).....	61
TABELA 4.2 -	COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES RELATIVAS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA).....	61
TABELA 4.3 -	VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADAS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (1ª ÉPOCA).....	62
TABELA 4.4 -	VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADAS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA).....	63
TABELA 4.5 -	RESÍDUOS ESTIMADOS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (1ª ÉPOCA).....	64
TABELA 4.6 -	RESÍDUOS ESTIMADOS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA).....	65
TABELA 4.7 -	VARIÂNCIAS A POSTERIORI DE TODAS AS ESTAÇÕES RELATIVAS ENVOLVIDAS NOS AJUSTAMENTOS DA 1ª E 2ª ÉPOCA.....	66
TABELA 6.1 -	RESULTADOS DOS TESTES GLOBAL DAS ESTAÇÕES RELATIVAS REFERENTES A 1ª E A 2ª ÉPOCA.....	74
TABELA 6.2 -	RESULTADOS DO TESTE DATA SNOOPING PARA A PRIMEIRA ÉPOCA.....	77
TABELA 6.3 -	RESULTADOS DO TESTE DATA SNOOPING PARA A SEGUNDA ÉPOCA.....	78
TABELA 6.4 -	REDUNDÂNCIAS PARCIAIS E RESPECTIVA DECISÃO SOBRE A CONTROLABILIDADE DAS OBSERVAÇÕES (1ª ÉPOCA).....	80
TABELA 6.5 -	REDUNDÂNCIAS PARCIAIS E RESPECTIVA DECISÃO SOBRE A CONTROLABILIDADE DAS OBSERVAÇÕES (1ª ÉPOCA).....	81
TABELA 6.6 -	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE INTERNA PARA A 1ª ÉPOCA.....	82

TABELA 6.7 -	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE INTERNA PARA A 2ª ÉPOCA.....	83
TABELA 6.8 -	MEDIDA DE CONFIABILIDADE EXTERNA.....	84
TABELA 6.8.1	COORDENADAS AJUSTADAS DA ESTAÇÃO CRCB COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA).....	85
TABELA 6.9 -	VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS DA ESTAÇÃO CRCB COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA).....	86
TABELA 6.10 -	RESULTADO DO TESTE GLOBAL DA ESTAÇÃO CRCB REFERENTE A 2ª ÉPOCA.....	86
TABELA 6.11 -	RESULTADO DO TESTE DATA SNOOPING PARA A SEGUNDA ÉPOCA.....	86
TABELA 6.12 -	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE INTERNA PARA A 2ª ÉPOCA.....	87
TABELA 6.13 -	DESLOCAMENTOS ESTIMADOS.....	88
TABELA 6.14 -	VARIÂNCIA A POSTERIORI ÚNICA ENTRE AS DUAS ÉPOCAS.....	88
TABELA 6.15 -	ESTATÍSTICA APLICADA NO PROCESSO DE ESTIMATIVA DOS DESLOCAMENTOS.....	89
TABELA 6.16 -	ESTATÍSTICA APLICADA NA ANÁLISE DA SENSIBILIDADE.....	89
TABELA 6.17 -	DESLOCAMENTOS MÍNIMOS DETECTÁVEIS.....	91
TABELA 6.18 -	COORDENADAS GEOGRÁFICAS ELIPSÓIDICAS AJUSTADAS 1ª ÉPOCA.....	94
TABELA 6.19	COORDENADAS GEOGRÁFICAS ELIPSÓIDICAS AJUSTADAS 2ª ÉPOCA.....	94
TABELA 6.20 -	ALTITUDES E DESLOCAMENTO VERTICAL DAS ESTAÇÕES RELATIVAS OBTIDAS PELO GPS.....	95
TABELA 6.21 -	DISCREPÂNCIAS APRESENTADAS PELO GPS.....	96
TABELA 6.22 -	COORDENADAS GEOGRÁFICAS ELIPSÓIDICAS DAS ESTAÇÕES BGI E CIC, REFERENTES A 1ª E A 2ª ÉPOCA.....	99
TABELA 6.23 -	ALTITUDES E DESLOCAMENTO VERTICAL DAS ESTAÇÕES BGI E CIC OBTIDAS PELO GPS.....	99
TABELA 6.24 -	DISCREPÂNCIAS APRESENTADAS PELO GPS, REFERENTES AS ESTAÇÕES RELATIVAS BGI E CIC.....	100

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 -	RESÍDUOS DA DUPLA-DIFERENÇA DE FASE DA PORTADORA L1 PARA OS SATÉLITES PRN 06, 09, 10, 15, 17, 24, 25 E 30 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 05 DA BASE KM03-UBR (1ª ÉPOCA).....	51
GRÁFICO 4.2 -	RESÍDUOS DA DUPLA-DIFERENÇA DE FASE DA PORTADORA L1 PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06, 10, 15, 17, 18, 23 E 24 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 30 DA BASE KM03-UBR (2ª ÉPOCA).....	52
GRÁFICO 4.3 -	RESÍDUOS DA DUPLA-DIFERENÇA DE FASE DA PORTADORA L1 (VIA LC) PARA OS SATÉLITES PRN 02, 04, 05, 07, 08, 09 E 24 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 26 DA BASE KM03-BTA (1ª ÉPOCA).....	52
GRÁFICO 4.4 -	RESÍDUOS DA DUPLA-DIFERENÇA DE FASE DA PORTADORA L1 (VIA LC) PARA OS SATÉLITES PRN 04, 05, 06, 10, 17, 24 E 30 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 09 DA BASE KM03-BTA (2ª ÉPOCA).....	53
GRÁFICO 4.5 -	RESÍDUOS DA DUPLA-DIFERENÇA DE FASE DA PORTADORA L1 PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06, 15, 17, 18, 21, 22, 25 E 30 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 23 DA BASE KM03-CCO (1ª ÉPOCA).....	54
GRÁFICO 4.6 -	DESVIO PADRÃO EM X,Y,Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO PARA, 1ª ÉPOCA.....	55
GRÁFICO 4.7 -	DESVIO PADRÃO EM X,Y,Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO PARA, 2ª ÉPOCA.....	55
GRÁFICO 4.8 -	DESVIO PADRÃO EM X,Y,Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO KM03, 1ª ÉPOCA.....	56
GRÁFICO 4.9 -	DESVIO PADRÃO EM X,Y,Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO KM03, 2ª ÉPOCA.....	56
GRÁFICO 5.1 -	DESVIOS PADRÃO DAS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES RELATIVAS DA PRIMEIRA E SEGUNDA ÉPOCA.....	68
GRÁFICO 6.1 -	HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS ESTIMADOS NA 1ª ÉPOCA.....	75
GRÁFICO 6.2 -	HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS ESTIMADOS NA 2ª ÉPOCA.....	75

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho do Sistema NAVSTAR-GPS na detecção de deslocamentos verticais. Para alcançar tal objetivo, utilizou-se o arcabouço de estações da Rede Geodésica GPS da COPEL (companhia Paranaense de Energia Elétrica), sobre a qual simulou-se deslocamentos verticais positivos e negativos. Para simulação destes deslocamentos utilizou-se o dispositivo “Base para Deformações”, o qual foi projetado para esta finalidade. No entanto, decidiu-se pela não simulação de deslocamentos verticais em algumas estações, visando verificar a repetibilidade de medidas do GPS. As estações relativas da Rede Geodésica GPS da COPEL foram posicionadas em função das estações base, KM03 e PARA, sendo esta pertencente a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Foram realizadas duas campanhas GPS em cada estação relativa, sendo que os deslocamentos verticais foram impostos na segunda campanha e, rigorosamente medidos com um paquímetro, para posterior análise e comparação com os resultados obtidos pelo GPS. As observações das duas campanhas foram processadas utilizando o programa PRISM da ASHTECH e, os respectivos ajustamentos foram realizados por meio de uma rotina desenvolvida no MATLAB, versão 5.2. Após os ajustamentos, realizou-se uma série de testes estatísticos, com o objetivo de detectar possíveis erros na observações. Na sequência, verificou-se a significância dos deslocamentos impostos nas estações relativas, por meio do critério de sensibilidade e das estatísticas do processo de estimativas de deslocamentos, sendo esta baseada no método dos mínimos quadrados. Finalmente, analisou-se os deslocamentos verticais das estações relativas aprovadas nos testes estatísticos.

ABSTRACT

The aim of this work is to analyse NAVSTAR-GPS System performance for vertical displacement detection. To reach this purpose, one have used the GPS geodetic network of COPEL (Electricity Company of the State of Paraná) on which was simulated positive and negative vertical displacement. A device system called "Deformation Base" was manufactured specially for this purpose and utilysed over the simulations. However one have decided to the non-simulation of vertical displacement in some stations in order to check the repeatability of the GPS measurements. The GPS network relative stations were positioned in function of the base stations KM03 and PARA which belongs to the RBMC (Continuos Monitoring Brazilian Network). Two GPS campaigns were performed on each relative stations. On the second campaign vertical displacements were applyed and straight measured with a sliding caliper for further analysis and comparisons to obtained GPS results data. Both campaign have been computed by PRISM software (ASHTECH). The adjustment of theses computations were carried out using on MATLAB software, version 5.2.. After the adjustments, a set of statistical test were carried out, so that it is possible to detect possibles errors in the observations. Furthermore one have checked the significance of the imposed displacements on the relative stations by applying the sensivity criterion and the displacements estimatives statisticals process on which is based on the least square method. Finally, one have analysed the relative stations vertical displacements assented by the statistical tests.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O TEMA: DEFINIÇÃO, DELIMITAÇÃO E IMPORTÂNCIA

Proteção ambiental, segurança de estruturas artificiais e prevenção de catástrofes, como por exemplo, terremotos e deslizamentos de terra, requerem sistemas de monitoramento adequados, seguidos de convenientes análises para o conhecimentos dos efeitos causativos, bem como dos mecanismos de deformações. Os aspectos envolvidos no monitoramento de deformações são muito amplos, devido a ocorrência de deformações em uma variada gama de estruturas, sejam elas naturais ou artificiais. Alguns exemplos destes aspectos são apresentados na seqüência.

De acordo com CONDIE (1982), os continentes que há aproximadamente 200 milhões de anos atrás, estavam agrupados, começaram a quebrar, afastando-se. Desde então, as américas foram levadas para longe da Europa e África por aproximadamente 5000 km.

A exploração de água subterrânea e a compactação do solo fazem com que cidades de grande porte afundem-se (DOLAN e GOODELL, 1986). Normalmente, estes afundamentos são mais significativos quando elas são construídas em sedimentos não consolidados, como por exemplo, siltes, lamas e areias. Levantamentos geodésicos realizados na cidade de Tóquio, mostraram que esta afundou em média 4,5 m (CHRZANOWSKI, 1994).

De acordo com GEMAEL et al. (1996), as barragens com mais de 100 m de altura são potencialmente sismogênicas. Desta maneira, com o conseqüente armazenamento de grandes massas de água, pode ocorrer que regiões propensas á sismicidade, acelerem o processo de ocorrência de sismos e, regiões assísmicas, tornem-se sismicamente ativas. Maiores detalhes podem ser vistos em GAGG (1997). Estudos realizados por CHRZANOWSKI et al. (1993) mostram que, das 36.000 grandes barragens existentes ao redor do mundo, pelo menos

duas represas todos os anos, são causadoras de catástrofes envolvendo vidas humanas.

Deslizamentos de terra, subsidência de terra em deltas de grandes rios (devido ao acúmulo de materiais levados por suas correntezas), micro-deformações em indústrias, deformações em imãs de aceleradores atômicos, são outros exemplos de deformações causadas por fenômenos naturais e artificiais. Deste modo, o planeta Terra com toda a sua infra-estrutura sendo deformada, tem infinitas aplicações para o desenvolvimento de novos sistemas de monitoramento e de análise de deslocamentos.

Nos últimos anos, pesquisadores de geociências tem realizados estudos isolados para detecção de deslocamentos, como é o caso de LIU (1998a), CHANG (2000a), ASTERIADIS (1998), SILVA (1986) E SAVVAIDIS et al. (1997), os quais tem se concentrado apenas no estudo de deslocamentos horizontais. No entanto, outros pesquisadores se dedicam na detecção e análise deslocamentos verticais, como por exemplo, PELZER et al. (1996), GEMAEL e FAGGION (1996), GAGG (1997) e, TEIXEIRA e FERREIRA (2001), muito embora a literatura mostre estudos de deformações tridimensionais, como é o caso de XAVIER (2000).

Um sistema de monitoramento utilizando instrumentação e técnicas geodésicas, pode ser aplicado para detectar com alta precisão deslocamentos verticais, tais como subsidências de grandes barragens, afundamento de cidades, subsidência do solo em deltas de grandes rios, deslizamento de terra, dentre outros. Medições de nivelamento geométrico (alta precisão) tem sido extensamente utilizadas para detectar tais deslocamentos. No entanto, de acordo com LIU (1998b) e CHANG (2000b) o nivelamento geométrico não é muito eficiente em termos de custos e rapidez nos levantamentos (quando comparado com outras técnicas), especialmente quando as áreas estáveis estão distantes da área de deformação, apesar desta técnica constituir-se em uma das mais precisas da geodésia.

O processo constante da evolução tecnológica, tem colocado a disposição dos profissionais de Geociências, novas técnicas e ferramentas para controle e para o monitoramento de estruturas, sejam elas naturais ou artificiais. Dentre os

frutos desta evolução está o NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System*), que aparece como um grande aliado para a detecção de deslocamentos verticais, uma vez que ele permite conectar áreas estáveis a instáveis separadas por vários quilômetros. Acrescenta-se ainda, outras vantagens como:

- a) independência de condições meteorológicas;
- b) posicionamento tridimensional; e
- c) não necessita de intervisibilidade entre estações.

A qualidade do posicionamento GPS tem melhorado significativamente desde a declaração da FOC (*Full Operation Capability – Capacidade de Operação Completa*) ocorrida em 27 de abril de 1995, quando os 24 satélites passaram a orbitar sem problemas (MONICO, 2000, p. 24). No entanto, dentre as desvantagens deste sistema, cita-se a componente altimétrica (h) que é sensível a alguns efeitos, como por exemplo a configuração geométrica dos satélites e aos erros não modelados da refração atmosférica. Estudos mostram que o erro na componente altimétrica é aproximadamente duas vezes maior do que nas componentes horizontais (RIZOS et al., 1989). Porém, de acordo com CHANG (2000b), o atual nível de precisão alcançado pelo GPS é suficiente para aplicações de pequenas escalas, como é o caso do monitoramento de deslocamento vertical.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho proposto, tem como objetivo principal analisar a viabilidade de aplicar o NAVSTAR-GPS na detecção de deslocamento vertical. No entanto, outros objetivos são pretendidos, tais como:

- apresentar o Critério de Sensibilidade na análise de deslocamentos;
- aplicar estes métodos em um estudo de caso, que no presente trabalho será a Rede Geodésica GPS da COPEL (Companhia Paranaense de

Energia Elétrica), situada nos municípios de Curitiba, São José dos Pinhais, Colombo e Paranaguá.

- verificar o desempenho do GPS na detecção de deslocamento vertical; e
- contribuir como subsídio à bibliografia nacional.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo de deslocamento vertical vem sendo realizado a várias décadas por meio de técnicas geodésicas terrestres, como por exemplo o nivelamento geométrico e Medidores Eletrônicos de Distância (MED). No entanto, as técnicas terrestres possuem algumas limitações, tais como necessidade de visibilidade entre estações, condições meteorológicas e custos. Deste modo, o estudo de deslocamento vertical pelo NAVSTAR-GPS descortina perspectivas promissoras, uma vez que ele permite a obtenção das coordenadas (ϕ , λ , h) com alta precisão (em muitos casos esta precisão pode chegar na ordem do milímetro, no modo relativo) e em “curto” período de tempo, tendo como outras vantagens a fácil operacionalidade e alta rentabilidade.

Em um projeto de monitoramento para detecção de deslocamento vertical, o NAVSTAR-GPS permite a conexão de áreas estáveis com a área de deformação, separadas por vários quilômetros, fornecendo informações de altitude elipsoidal (h) em tempo relativamente curto e com baixos custos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em 7 capítulos. No capítulo 2 são apresentados os princípios fundamentais sobre o Sistema NAVSTAR-GPS, ajustamento de observações, testes estatísticos aplicados na análise de redes geodésicas, os critérios das medidas de qualidade de rede geodésicas.

Os procedimentos utilizados para os levantamentos de campo e simulação dos deslocamentos verticais na rede Geodésica GPS da COPEL, bem como, os equipamentos utilizados, estão descritos capítulo 3.

No capítulo 4, são apresentados o pós-processamento e ajustamento das observações GPS, juntamente com os programas utilizados.

A análise dos ajustamentos realizados no capítulo 4, bem como a análise do critério de acurácia de rede, estão descritos no capítulo 5.

No capítulo 6, são apresentados os resultados dos testes estatísticos empregados na detecção de erros e de deslocamentos da rede, bem como, a análise dos deslocamentos verticais impostos nas estações relativas.

E, por último, são apresentadas as conclusões e recomendações no capítulo 7.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

O NAVSTAR-GPS é um sistema de rádio navegação resultante da fusão dos programas *Timation* (desenvolvido pela Marinha) e o *System 621B* (desenvolvido pela Força Área), ambos financiados pelo governo dos Estados Unidos da América (EUA). Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA – DoD (*Department of Defense*), em princípio para atender aos interesses das forças armadas americanas. Mas pouco tempo depois, o Congresso Americano sob orientação da Presidência da República, autorizou o uso do sistema para a comunidade civil.

Com a observação simultânea de no mínimo quatro satélites acima do horizonte, este sistema permite aos seus usuários o posicionamento em tempo real na superfície terrestre ou próximo a ela, independentemente das condições atmosféricas. Este posicionamento é determinado pelas seguintes observáveis básicas do GPS (SEEBER, 1993):

- Pseudodistância a partir do código, e
- Fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

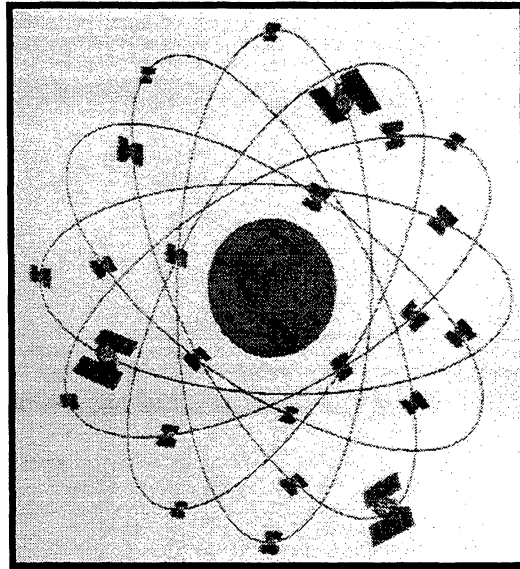
Elas são obtidas a partir dos códigos C/A (*Coarse Acquisition*) e P (*Precise code*) ou das duas ondas portadoras L1 e L2. A portadora L1 com frequência de 1575,42 MHz e comprimento de onda de 19,05 cm é modulada pelos códigos C/A e P, enquanto a portadora L2 com frequência de 1227,60 MHz e comprimento de onda de 24,45 cm é modulada somente pelo código P. Detalhes podem ser vistos em SEEBER (1993) e MONICO (2000).

O sistema GPS consiste de três segmentos principais: espacial, de controle e de usuários.

O Segmento Espacial consiste de 24 satélites distribuídos em 6 planos orbitais igualmente espaçados entre si de 60°, com 4 satélites em cada plano, numa altitude aproximada de 20200 km. Cada plano possui 55° de inclinação em relação ao equador e, o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Atualmente fazem parte da constelação dos satélites GPS, os satélites dos Blocos II, IIA e IIR. Eles formam uma base de tempo muito precisa devido ao fato de serem equipados

com relógios de Césio e Rubídio. Os satélites do Bloco IIF substituirão os satélites do Bloco IIR e, poderão ser equipados com Maser de Hidrogênio, o que há de melhor nos dias atuais em termos de padrão de frequência (MONICO, 2000). A figura 2.1 ilustra a constelação dos satélites GPS.

FIGURA 2.1 – CONSTELAÇÃO DOS SATÉLITES GPS



FONTE: IDEA, 1996.

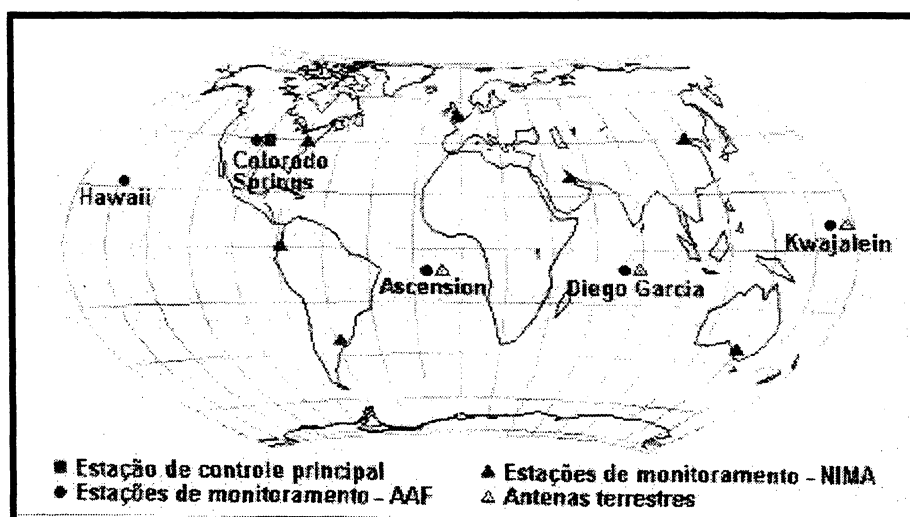
Apesar do sistema ter sido declarado operacional em 27 de abril de 1995, os usuários do Sistema GPS foram afetados pela política de segurança americana com a introdução da SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva) e do AS (*Anti-Spoofing*) sobre os satélites do Bloco II. A SA consiste da degradação dos sinais dos satélites através da manipulação da efemérides transmitidas (Técnica Épsilon - ϵ) e, na desestabilização sistemática do oscilador do satélite (Técnica Dither - δ). A partir das 4h TU (Tempo Universal) do dia 02/05/2000 quando a SA foi desativada, a qualidade do posicionamento instantâneo de um ponto (tempo real) melhorou cerca de 10 vezes. O AS foi ativado em 31 de janeiro de 1994 e consiste na criptografia do código preciso (P), sobre as duas fases da portadora L1 e L2 em um código secreto denominado de código Y. Deste modo, o acesso ao código P só é possível instalando-se no receptor o *Auxiliary Output Chip* (AOC), que é liberado apenas para usuários autorizados.

O Segmento de Controle tem como propósito:

- controlar e monitorar continuamente o sistema de satélites;
- Predizer as efemérides e o comportamento dos relógios dos satélites;
- Determinar o sistema de tempo GPS; e
- Atualizar periodicamente as mensagens de navegação.

Este segmento é composto por cinco estações monitoras localizadas no Hawaii, Colorado Springs, Ascension Island (Atlântico Sul), Diego Garcia (Oceano Índico) e Kwajalein (Pacífico Norte) e, sendo a Estação de Controle Central (MCS – Master Control Station) localizada em Colorado Springs, Colorado/EUA. As estações de monitoramento equipadas com receptores de dupla frequência, múltiplos-canais e com relógios atômicos, determinam as pseudodistâncias dos satélites visíveis e coletam os dados meteorológicos locais, estes são enviados até a MCS. Com estes dados a MCS calcula as órbitas, os parâmetros dos relógios dos satélites e futuras posições dos mesmos. Estas informações são enviadas para os satélites a partir das antenas terrestres. A figura 2.2 mostra a disposição do segmento de controle principal, monitoramento e antenas terrestres.

FIGURA 2.2 – DISPOSIÇÃO DO SEGMENTO DE CONTROLE



FONTE: MONICO, 2000, P.34.

O segmento de Usuários é constituído pelos receptores GPS, os quais são utilizados em função das aplicações de Navegação, Geodésia, SIG (Sistema de

Informações Geográficas), dentre outras. Detalhes podem ser vistos em MONICO (2000), LEICK (1995) e SEEGER (1993).

2.1.1 Modernização do GPS

Com o objetivo principal de beneficiar a comunidade usuária de GPS, civil e militar, têm-se realizado pesquisas com vistas à modernização deste sistema. Ela tem ocorrido nos dois segmentos principais, segmento de controle e espacial, acarreta em elevados custos de implementação (McDonald, 1999 apud MONICO, 2000, p. 270-271).

2.1.1.1 Segmento de controle

Com o desenvolvimento e aprimoramento do sistema foram adicionadas sete estações (figura 2.2) a este segmento, pertencentes ao NIMA (*National and Mapping Imagery Agency*), as quais estão localizadas no Equador, Argentina, Inglaterra, Bahrain, Austrália, China e USNO (CUNNINGHAM et al. 1999).

Ainda ocorreram ou deverão ocorrer as seguintes melhorias (MONICO, 2000, p. 271):

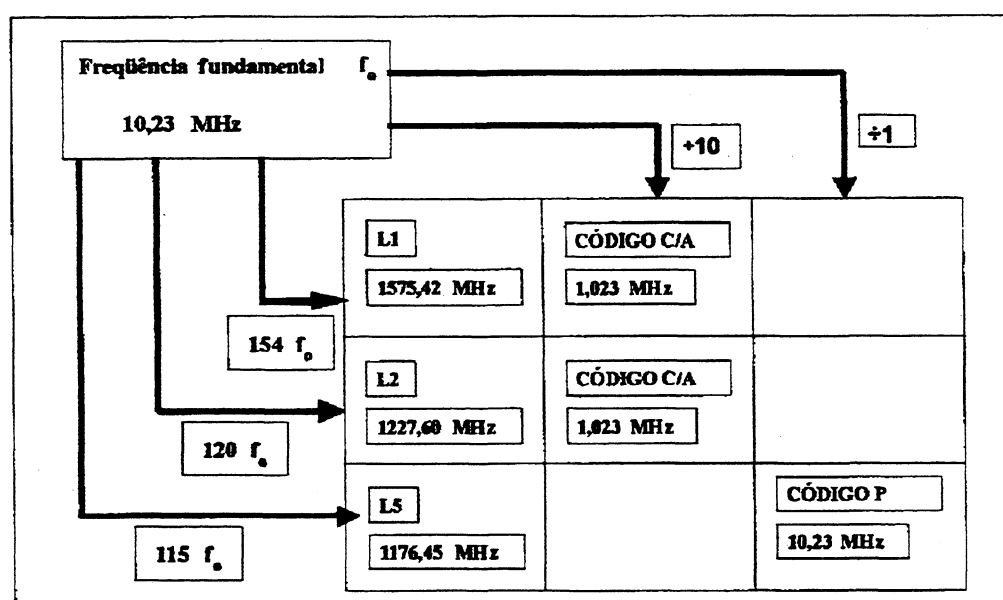
- Navegação autônoma (Auto-Nav) dos satélites dos Blocos IIR e IIF;
- Inserção da SD (*Selective Denial* – Proibição Seletiva), apesar de que ainda não está claro como esta será colocada em prática;
- Extensão do controle do GPS a membros da comunidade civil.

2.1.1.2 Segmento espacial

De acordo com MONICO (2000, p. 271) as melhorias deste segmento se dará em especial na estrutura do sinal. Em que dois novos sinais civis farão parte do GPS no futuro. O primeiro será realizado pela modulação do código P. O segundo será baseado sobre uma nova portadora, denominada L5, cuja frequência é de

1.176,45 MHz, no domínio espectral do ARNSs (*Aeronautical Radio Navigation Services* – Serviço de Rádio Navegação da Aeronáutica) e, na modulação do código C/A na portadora L2. Melhores precisões para as medidas de fase de batimento e, rastreamento mais acurado da portadora serão alcançados com esta nova concepção (MCDONALD, 1999). A figura 2.3 mostra um resumo do que será a nova estrutura dos sinais GPS para uso civil.

FIGURA 2.3 – ESTRUTURA DOS SINAIS GPS APÓS A MODERNIZAÇÃO



FONTE: MONICO (2000, P. 273)

2.1.2 Métodos de Posicionamento GPS

O posicionamento por GPS pode ser realizado no método absoluto e no método relativo. O posicionamento absoluto pode ser realizado pelas técnicas estática e cinemática, enquanto o posicionamento relativo pelas técnicas estática, cinemática e diferencial. Detalhes podem ser vistos em KRUEGER (1996). No posicionamento absoluto é utilizado apenas um receptor e, as coordenadas de um ponto são determinadas em tempo real, utilizando a pseudodistância derivada do código C/A na portadora L1. No posicionamento relativo um receptor permanece fixo sobre uma estação de coordenadas conhecidas e outro receptor ocupa pontos de

interesse, rastreando simultaneamente um grupo de pelo menos dois satélites comuns, durante um período que pode variar de dezenas de minutos até algumas horas. Neste método são empregadas como observáveis fundamentais as duplas diferenças da fase de batimento da onda portadora.

Dentre as técnicas de posicionamento relativo citadas, somente a técnica estática será utilizada no trabalho proposto, sendo então descrita na sequência.

2.1.2.1 Técnica estática

O conceito fundamental envolvido nesta técnica de posicionamento relativo é que dois ou mais receptores rastreiam simultaneamente, os satélites visíveis por um período de tempo que é definido em função da distância entre os receptores. Normalmente são incluídas como observáveis as duplas diferenças da fase de batimento da onda portadora, pois oferecem maiores precisões que as pseudodistâncias. No entanto, as pseudodistâncias são utilizadas no pré-processamento para estimar o erro do relógio do receptor, ou calcular o instante aproximado de transmissão do sinal pelo satélite (MONICO, 2000).

Esta técnica permite as melhores precisões dentro da tecnologia GPS, geralmente entre 1,0 a 0,1 ppm, ou mesmo melhor que isso. No entanto, cuidados especiais devem ser tomados quanto a escolha de receptores, pois no caso de linhas de base maiores que 10 a 15 km, onde a precisão requerida seja melhor que 1,0 ppm, é necessário o uso de receptores de dupla frequência MONICO (2000, p. 211-212).

2.1.3 Fontes de Erros no Posicionamento

Os diversos erros presentes no sistema NAVSTAR-GPS são agrupados em erros provenientes dos satélites, erros na propagação do sinal, erros do receptor/antena e erros da estação. Maiores detalhes poderão ser vistos em MONICO (2000, p. 120-121) e KRUEGER (1996, p. 33-34). Dentre estes cita-se:

- Erro orbital;
- Erros no relógio do satélite;

- Erros no relógio do receptor;
- Refração troposférica;
- Refração ionosférica;
- Centro de fase da antena; e
- Efeito multicaminho.

Na sequência, estes erros, bem como os métodos os modelos utilizados para minimizá-los serão descritos resumidamente.

a) Erro Orbital

Este refere-se à diferença existente entre a órbita verdadeira e a transmitida (*Broadcast Ephemerides*) para os satélites. Um erro nas coordenadas dos satélites, calculadas a partir das efemérides, se propagará para a antena do usuário. Este erro é mais crítico para o posicionamento absoluto, pois ele será propagado diretamente para a antena do usuário. Para o posicionamento relativo, quando as estações não estão muito distante de si, esse erro é praticamente eliminado ao se utilizar a DDF (Dupla Diferença de Fase) (seção 2.1.4). No entanto, de acordo com MONICO (2000, p. 122) erros remanescentes degradam a acurácia da linha base na medida em que essa se torna mais longa. O erro na base em função do erro na posição do satélite é dado por (WELLS et al., 1986 apud MONICO, 2000, p. 123):

$$\Delta b = b \frac{\Delta r}{r} \quad , \quad (2.1)$$

em que:

$\Delta b \rightarrow$ é o erro resultante na linha de base;

$b \rightarrow$ é o comprimento da linha de base (km);

$\Delta r \rightarrow$ é o erro na posição do satélite; e

$r \rightarrow$ é a distância do satélite ao receptor.

A tabela 2.1 mostra os efeitos dos erros orbitais em linhas de base com comprimento variando de 10 a 5000 km.

TABELA 2.1 – EFEITOS DOS ERROS ORBITAIS NAS LINHA DE BASE

Efemérides	Erro orbital Δr (m)	Comprimento da base b (km)	Erro na base Δb (cm)	Acuracidade relativa $\Delta b / b$ (ppm)
Transmitidas	10	10 100 1000 5000	0,5 5 20 250	0,5
Transmitidas	20	10 100 1000 5000	1 10 100 500	1,0
Precisas (IGS)	0,1	10 100 1000 5000	0,005 0,05 0,5 2,5	0,005
Preditas (IGP)	1	10 100 1000 5000	0,05 0,5 5 25	0,05

FONTE: MONICO (2000, P. 124)

b) Erro do Relógio do Satélite

Este erro é proveniente do não-sincronismo do relógio do satélite com o sistema de tempo GPS. De acordo com WELLS et al. (1986) esta diferença é de no máximo 1 milissegundo. Os relógios são monitorados pelo segmento de controle, que envia ao usuário o comportamento destes na forma de um polinômio de segunda ordem, dado por (MONICO, 2000, P. 125):

$$dt^s(t) = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \quad (2.2)$$

em que:

$dt^s(t) \rightarrow$ é o erro do relógio no instante t da escala de tempo GPS;

$t_{oc} \rightarrow$ é o instante de referência do relógio (clock);

$a_0 \rightarrow$ é o estado do relógio no instante de referência;

$a_1 \rightarrow$ é a marcha linear do relógio; e

$a_2 \rightarrow$ é a variação da marcha do relógio.

De acordo com KRUEGER (1996, p. 34) esse erro influencia as pseudodistâncias levantadas e, o erro resultante é da ordem de 1 a 10 m. No entanto, estes erros podem ser eliminados, no posicionamento relativo, ao se utilizar combinações lineares de observações envolvendo receptores e satélites (Simples, Dupla e Tripla Diferença de Fase).

c) Erro do Relógio do Receptor

Os receptores GPS possuem a sua própria escala de tempo, definida por seu oscilador interno e, que difere da escala de tempo GPS. Estes osciladores, normalmente de quartzo, possuem boa estabilidade interna e são de custos baixos. No entanto, os receptores GPS equipados com osciladores de alta estabilidade, são utilizados para o estabelecimento de redes geodésicas de alta precisão, porém, são de custos bastante elevados (MONICO, 2000, p. 151). Entretanto, os erros dos relógios dos receptores são praticamente eliminados no posicionamento relativo, não necessitando assim, de se utilizar para a maioria das aplicações osciladores de alta estabilidade.

d) Refração Troposférica

A troposfera é a camada da atmosfera que possui uma espessura de aproximadamente 50 km e é relativamente neutra. Nesta camada o meio é não dispersivo, portanto, os sinais sofreram atrasos, devido a fatores meteorológicos locais (temperatura, umidade e pressão). Os atrasos do sinal na troposfera são críticos para o posicionamento de precisão e para a determinação de uma linha de base longa, principalmente para a altitude (KRUEGER, 1996, P. 35). Para linhas de base até 50 km, o erro troposférico residual desaparece quase que por completo ao se utilizar a DDF (ANEXO I). Para linhas de base longas, os efeitos do atraso

troposférico podem ser minimizados pela utilização de modelos troposféricos existentes, como os de Hopfield ou Saastomoinen. Maiores detalhes poderão ser vistos em SAASTAMOINEN (1973) e HOPFIELD (1971).

e) Refração Ionosférica

A ionosfera é a camada da atmosfera que vai de aproximadamente 50 km até ± 1000 km. Por ser esta camada dispersiva, o índice de refração dos sinais eletromagnéticos que a atravessam dependem da frequência. Desta maneira, o índice de refração é menor que 1 para a fase e, maior que 1 para o grupo (códigos modulados sobre a portadora) (LEICK, 1995, 294-295). Por isso, durante a propagação do sinal, a velocidade da fase da portadora (V_f) sofrerá um retardo, enquanto a velocidade do grupo (V_g) sofrerá um avanço. Esses efeitos podem ser tratados por meio do uso de modelos matemáticos existentes, como por exemplo o Kobluchar (KLOBUCHAR, 1986). Para receptores GPS de dupla frequência, o erro devido ao efeito ionosférico será minimizado (MONICO, 2000, p. 142).

f) Centro de Fase da Antena

As ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites GPS percorrem a atmosfera até atingir as antenas dos receptores. Teoricamente, a posição calculada pelo receptor é o centro de fase da antena ou seu centro eletrônico. Desse modo, esse erro é caracterizado pelo fato desse centro não coincidir com o seu centro geométrico, havendo então, diferenças de ordem milimétrica à centimétrica se as antenas forem de diferentes fabricantes (KRUEGER, 1996, p. 37). Neste caso então deve-se proceder a uma calibração das antenas, pois as discrepâncias variam com a intensidade e direção dos sinais e, são diferentes para a portadora L1 e L2 (MONICO, 2000, p. 142). Antenas de mesmo fabricante e modelos iguais, não apresentam maiores problemas, pois, estas normalmente possuem o centro de fase alocado num mesmo ponto. Neste caso, é possível considerar esse erro como eliminado, no posicionamento relativo, quando estas antenas forem orientadas para uma mesma direção.

g) Efeito Multicaminho

O efeito do multicaminhamento é o resultado da interferência entre o sinal enviado diretamente pelo satélite e os sinais refletidos, os quais chegam as antenas dos receptores por mais de um caminho natural. Estas reflexões podem ser horizontais, verticais ou inclinadas. Este efeito é dependente da frequência, ou seja, o erro máximo será menor, quanto maior for a frequência. Desse modo, a portadora é menos afetada do que o código. No caso de uso da portadora, no posicionamento relativo, em distâncias curtas e, com boa geometria dos satélites, o erro deve ser em geral inferior a 1 cm (SEGANTINE, 1996, p. 78). Esse efeito é dependente também do tipo de antena utilizada, isto é, menor para as antenas de aba larga (*choke ring*). De acordo com KRUEGER (1996, p. 37), na utilização da DDF, no posicionamento relativo, esse erro não é eliminado, podendo até apresentar um aumento na sua influência.

Muito embora, a literatura mostre outros efeitos que podem conduzir a erros no posicionamento pelo sistema NAVSTAR-GPS, como por exemplo:

- Relatividade;
- Perdas de ciclos (*cycle slips*);
- Rotação da Terra;
- Marés terrestres;
- Movimento do pólo;
- Carga dos oceanos;
- Pressão atmosférica; e
- Instabilidade do solo e do tripé.

Estes podem ser, em sua maioria, eliminados ou minimizados por modelos matemáticos e metodologias de campo adequadas. Detalhes podem ser vistos em KRUEGER (1996, p. 37), MONICO (2000, p. 145-149), SEGANTINE (1996, p. 76-78), SANTOS (1999, p. 33) e LEICK (1995, p. 311-316).

2.1.4 Combinações Lineares de Observações

Com o propósito de reduzir alguns dos erros citados na seção anterior, os quais afetam as observações GPS (degradando o posicionamento), podem ser formadas combinações lineares de observações envolvendo receptores e satélites. Estas combinações podem ser:

- Simples Diferença de Fase (SDF);
- Dupla Diferença de Fase (DDF);
- Tripla Diferença de Fase (TDF).

2.2 AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O Método dos Mínimos Quadrados (M.M.Q) foi introduzido por Gauss e Legendre antes dos século XIX para ajustamento das observações físicas e astronômicas. Este método proporciona uma estimativa única para cada uma das incógnitas existentes em um conjunto de observações redundantes. Para tal tarefa, ele conduz a melhor solução pela minimização da soma dos quadrados das discrepâncias ponderadas entre medidas. Detalhes podem ser vistos em GEMAEL (1994, p.11-15) e LEICK (1995, p.93-100).

Em Ciências Geodésicas, os três métodos básicos de ajustamento são:

- Método paramétrico;
- Método dos correlatos; e
- Método combinado.

No método paramétrico, as observações são expressas em função dos parâmetros, enquanto que no método dos correlatos as observações se ligam através de equações de condição e, finalmente, no método combinado parâmetros e equações de condição se relacionam através de funções implícitas. Para o ajustamento da rede no trabalho proposto, será utilizado somente o método paramétrico. Maiores detalhes destes métodos consultar VANICEK e KRAKIWSKY (1986), LEICK (1995) e GEMAEL (1994).

2.3 TESTE GLOBAL E TESTE DATA SNOOPING

O teste global é utilizado com o propósito de verificar a compatibilidade das observações com o modelo matemático (funcional e estocástico) empregado (MORAES, 2001, p. 197). Este teste indica a qualidade do ajustamento, se o mesmo apresenta ou não um bom desempenho.

A estatística do teste de erros grosseiros para a i -ésima observação é dada pelo teste Data Snooping de Baarda (BAARDA, 1968). Este teste tem como objetivo principal a localização de erros embutidos nas observações.

2.3.1 Teste global

O teste global testa a compatibilidade do fator de variância a posteriori ($\hat{\sigma}_o^2$) com o fator de variância a priori (σ_o^2), estabelecendo-se, então, a comparação entre estes dois fatores. Esta comparação se baseia no fato de que a forma quadrática $V^T P V$ tem distribuição χ^2 com $(n - u)$ graus de liberdade (GEMAEL, 1994, p.123). A literatura apresenta duas possibilidades, para a realização desta comparação: O teste Global Unilateral e o teste Global Bilateral. Neste trabalho, será utilizado o teste Global Unilateral, pois ele é o mais indicado. Deste modo, para a realização deste teste, estabelece-se, inicialmente, o teste de hipótese (MIKHAIL, 1976, p. 294-295):

$$\text{Hipótese básica (H}_0\text{)} \quad \rightarrow \quad H_0 : \sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$$

$$\text{Hipótese alternativa (H}_1\text{)} \quad \rightarrow \quad H_1 : \sigma_o^2 < \hat{\sigma}_o^2$$

Calcula-se:

$$\chi^{*2} = \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} (n - u), \quad \text{ou} \quad \chi^{*2} = \frac{V^T P V}{\sigma_o^2}, \quad (2.3)$$

H_0 não é rejeitada, ao nível de significância α , se:

$$\chi^{*2} < \chi_{v;1-\alpha}^2 \quad (2.4)$$

onde:

$$\chi_{v;1-\alpha}^2 \quad (2.5)$$

é o valor teórico.

No caso de rejeição da hipótese básica, o ajustamento apresenta problema que se pode atribuir a várias causas (GEMAEL, 1994, p. 302):

- a) erros grosseiros;
- b) sistema mal condicionado;
- c) modelo matemático inadequado;
- d) erros de cálculo;
- e) ponderação errônea das observações; e
- f) problema na linearização.

Desse modo, na falha do teste global, esforços devem ser feitos para em princípio examinar e, conseqüentemente, solucionar possíveis problemas dos itens b a f acima descritos. Na seqüência, um novo ajustamento é feito e, se o teste global falhar novamente, pode-se atribuir a presença de erros grosseiros. Desta maneira, uma análise adicional com o teste data snooping é realizada para a localização destes erros.

2.3.2 Teste Data Snooping

O teste Data Snooping é realizado a partir dos resíduos individuais (ω_i) , como se segue (KUANG, 1996):

$$\omega_i = \frac{-c_i^T P V}{\sigma_0 \sqrt{c_i^T P Q_V P c_i}}, \quad (2.6)$$

onde: P é a matriz dos pesos, V é vetor de resíduos, σ_0 é o desvio padrão a priori e, c_i é um vetor de zeros exceto para i -ésima posição que contém o resíduo a ser analisado, o qual terá valor unitário, por exemplo $c_i = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$. Q_V é a matriz cofatora dos resíduos, expressa por:

$$Q_V = \frac{1}{\sigma_0^2} \sum V. \quad (2.7)$$

Quando as observações não são correlacionadas o teste Data Snooping é reduzido a resíduos padronizados:

$$\omega_i = \frac{v_i}{\sqrt{\sigma_{v_i}^2}}, \quad (2.8)$$

onde: v_i representa o resíduo analisado e $\sigma_{v_i}^2$ a sua correspondente variância.

Deste modo, os erros significativos são indicados pelos resíduos individuais ou padronizados que extrapolam o intervalo de confiança $(1-\alpha_0)$. O intervalo de confiança é obtido em função da distribuição normal reduzida, expressa por:

$$-Z_{\frac{\alpha_0}{2}}(0,1) \leq \omega_i \leq +Z_{\frac{\alpha_0}{2}}(0,1). \quad (2.9)$$

Como a distribuição normal é simétrica, é possível substituir o intervalo de confiança $(1-\alpha_0)$ por um valor limite (δ_0 - Parâmetro de não-centralidade). Deste modo, a i -ésima observação terá um erro significativo se:

$$|\omega_i| > \delta_0 , \quad (2.10)$$

2.4 ANÁLISE DE QUALIDADE DE REDE GEODÉSICA

As medidas de qualidade de uma rede geodésica de controle ou de monitoramento são descritas pelos critérios de precisão, confiabilidade, sensibilidade e custos. No primeiro critério, analisa-se por meio da geometria da rede como a precisão das observações afetam os resultados. É uma medida da característica da rede na propagação de erros aleatórios, admitindo a ausência de erros grosseiros e/ou sistemáticos nas observações (KUANG, 1996, p.147).

O critério de confiabilidade descreve como a rede reage a erros mínimos nas observações e, visa determiná-los a um nível de confiança $(1-\alpha)$ e poder de teste $(1-\beta)$. Este critério refere-se a robustez da rede, ou seja, a sua habilidade para detectar erros.

O critério de sensibilidade descreve a habilidade da rede para detectar deslocamentos ou parâmetros de deformações a um nível de confiança $(1-\alpha)$ e poder de teste $(1-\beta)$. O cumprimento das etapas anteriores são benéficas ao melhoramento da análise de sensibilidade.

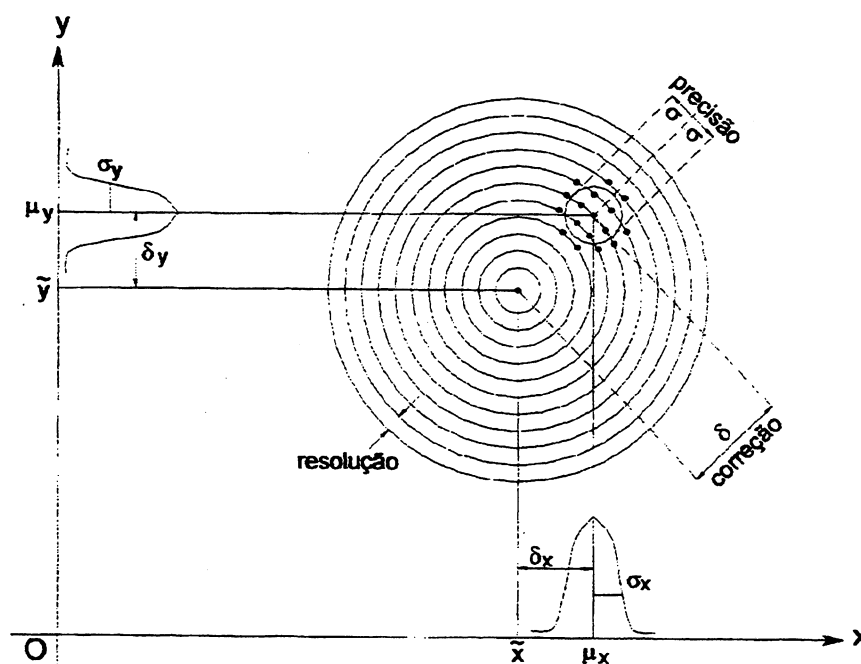
Finalmente, o último critério se refere aos custos associados aos levantamentos de campo, os quais podem diferir para cada tipo de aplicação.

Neste trabalho serão utilizados os critérios de acurácia, confiabilidade e sensibilidade.

2.4.1 Medidas de Precisão

A medida de acurácia depende de dois critérios: a precisão e a correção, conforme esclarece a figura 2.4, em que a precisão é a medida de dispersão das observações em torno de um valor médio e, a correção é a medida do afastamento deste valor médio em relação ao valor verdadeiro (MORAES, 2001, p. 180-181).

FIGURA 2.4 – PRECISÃO E CORREÇÃO COMO CRITÉRIOS DE ACURÁCIA



FONTE: SCHMIDT (1997, p. 215)

NOTA: Traduzido do original por MORAES (2001, p. 181).

Na figura 2.4, \tilde{x} e \tilde{y} , μ_x e μ_y e, δ_x e δ_y , representam, respectivamente, a projeção no eixo x e no eixo y do valor verdadeiro, do vetor médio populacional e da correção; σ_x e σ_y , representam o desvio padrão em x e y, respectivamente, das n grandezas medidas.

As informações do critério de precisão para a rede geodésica estão contidas na Matriz Variância-Covariância (MVC) dos parâmetros ajustados ($\sum X_a$). Admitindo-se um espaço tridimensional (X, Y, Z), têm-se:

$$\Sigma X_a = \sigma_0^2 N^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1x_1} & & & & & & & & \\ \sigma_{y_1x_1} & \sigma_{y_1y_1} & & & & & & & \\ \sigma_{z_1x_1} & \sigma_{z_1y_1} & \sigma_{z_1z_1} & & & & & & \\ \sigma_{x_2x_1} & \sigma_{x_2y_1} & \sigma_{x_2z_1} & \sigma_{x_2x_2} & & & & & \\ \sigma_{y_2x_1} & \sigma_{y_2y_1} & \sigma_{y_2z_1} & \sigma_{y_2x_2} & \sigma_{y_2y_2} & & & & \\ \sigma_{z_2x_1} & \sigma_{z_2y_1} & \sigma_{z_2z_1} & \sigma_{z_2x_2} & \sigma_{z_2y_2} & \sigma_{z_2z_2} & & & \\ \sigma_{x_ux_1} & \sigma_{x_uy_1} & \sigma_{x_uz_1} & \sigma_{x_ux_2} & \sigma_{x_uy_2} & \sigma_{x_uz_2} & \sigma_{x_ux_u} & & \\ \sigma_{y_ux_1} & \sigma_{y_uy_1} & \sigma_{y_uz_1} & \sigma_{y_ux_2} & \sigma_{y_uy_2} & \sigma_{y_uz_2} & \sigma_{y_ux_u} & \sigma_{y_uy_u} & \\ \sigma_{z_ux_1} & \sigma_{z_uy_1} & \sigma_{z_uz_1} & \sigma_{z_ux_2} & \sigma_{z_uy_2} & \sigma_{z_uz_2} & \sigma_{z_ux_u} & \sigma_{z_uy_u} & \sigma_{z_uz_u} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

onde: N é a matriz dos coeficientes das incógnitas das equações normais.

A MVC ΣX_a é uma matriz quadrada positiva definida, podendo então, ser decomposta em valores próprios (λ_j) e vetores próprios (s_j). A equação do valor próprio associado ao vetor próprio é dada por:

$$(\Sigma X_a - \lambda I) \mathbf{S} = 0, \quad (2.12)$$

aplicando a decomposição espectral, fica:

$$\Sigma X_a = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_u \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & \dots & \dots & \dots \\ s_2 & \dots & \dots & \dots \\ s_3 & \dots & \dots & \dots \\ s_u & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

A partir desta decomposição é possível descrever uma das propriedades das componentes principais, expressas por:

$$Y_j = s_j \sqrt{\lambda_j}, \quad \text{com } (j=1, \dots, u) \quad (2.14)$$

onde: Y_j é a representação de um semi-eixo qualquer do hipér-elipsóide de confiança e, $\sqrt{\lambda_j}$ e s_j são respectivamente a dimensão e orientação deste semi-eixo.

2.4.1.1 Semi-eixos da elipse de erro

A interpretação geométrica da elipse de erro, na hipótese da distribuição normal dos erros, é que ela delimita a porção do plano que, com 39% de probabilidade, contém a posição verdadeira do ponto (SURACE¹ apud DE MORAES, 2001, p. 186).

A expressão dos semi-eixos a e b , e do ângulo de orientação θ da elipse são dadas por:

$$a = \hat{\sigma}_{\max.} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sigma_{x_i x_i} + \sigma_{y_i y_i} + \sqrt{(\sigma_{x_i x_i} - \sigma_{y_i y_i})^2 + 4\sigma_{x_i y_i}} \right]} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\lambda_{\max.}} \quad , \quad (2.15)$$

$$b = \hat{\sigma}_{\min.} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sigma_{x_i x_i} + \sigma_{y_i y_i} - \sqrt{(\sigma_{x_i x_i} - \sigma_{y_i y_i})^2 + 4\sigma_{x_i y_i}} \right]} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\lambda_{\min.}} \quad , \quad (2.16)$$

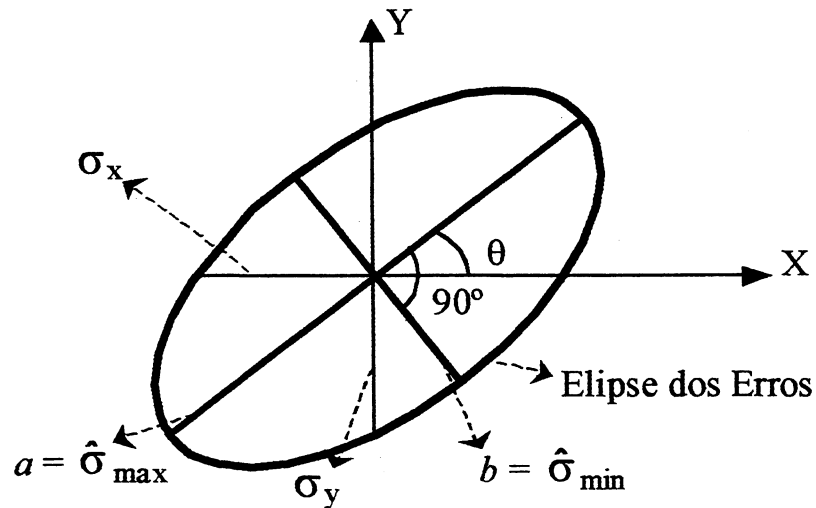
$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\sigma_{x_i y_i}}{\sigma_{x_i x_i} - \sigma_{y_i y_i}} \quad (2.17)$$

O ângulo $\theta \leq \pi$ é o azimuth da direção do semi-eixo a , e $\theta + \pi/2$ é azimuth da direção do semi-eixo b .

A figura 2.5 mostra os semi-eixos da elipse de erros com sua respectiva orientação.

¹ SURACE, L. (1995): Analisi delle Precision della Rete Geodetica Fondamentale nel Sistema IGM 83. Bolletino di Geodesia e Scienze Affini, Firenze, v. 54, n. 2, p. 177-208.

FIGURA 2.5 – ELIPSE DOS ERROS



2.4.1.2 Análise da primeira componente principal no plano (X,Y) e no eixo (Z)

Após a decomposição espectral da MVC $\sum X_a$ (equação 2.13) e, utilizando somente o valor próprio (λ_1), pois este apresenta o maior índice de variância entre os demais, calcula-se a sua direção em cada estação relativa no plano (X,Y) e eixo (Z) (NIEMEIER e HOLLMANN, 1984, p. 64-71). Para o caso de uma rede geodésica tridimensional (X,Y,Z) composta por três estações ($u=9$), as direções de cada estação em relação ao plano (X,Y) e ao eixo (Z), podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$Y_1 = S_{1j} \sqrt{\lambda_1} = \begin{bmatrix} s_{11} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{12} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{13} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{14} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{15} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{16} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{17} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{18} \sqrt{\lambda_1} \\ s_{19} \sqrt{\lambda_1} \end{bmatrix} \cdot (j = 1, \dots, u) \quad (2.18)$$

As direções de cada estação em relação ao plano (X,Y) e ao eixo (Z), podem ser vistas nas figuras 2.6 e 2.7, respectivamente.

FIGURA 2.6 – ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE PRINCIPAL NO PLANO (X,Y)

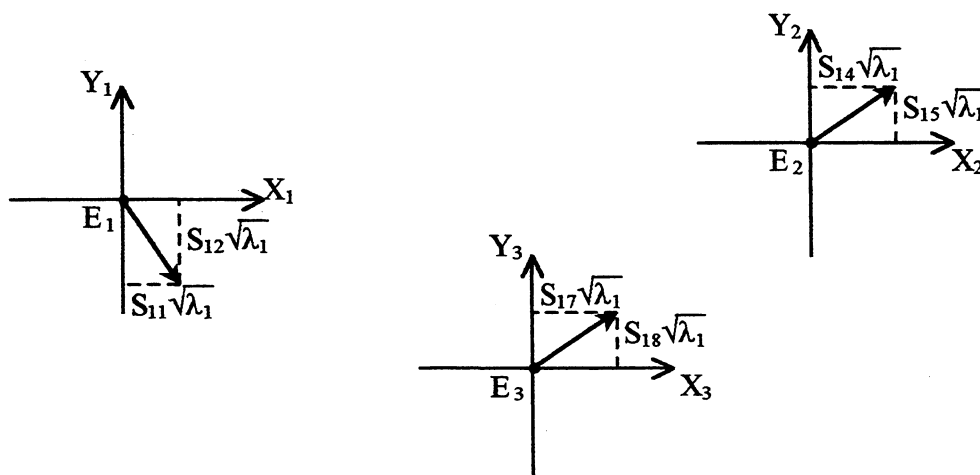
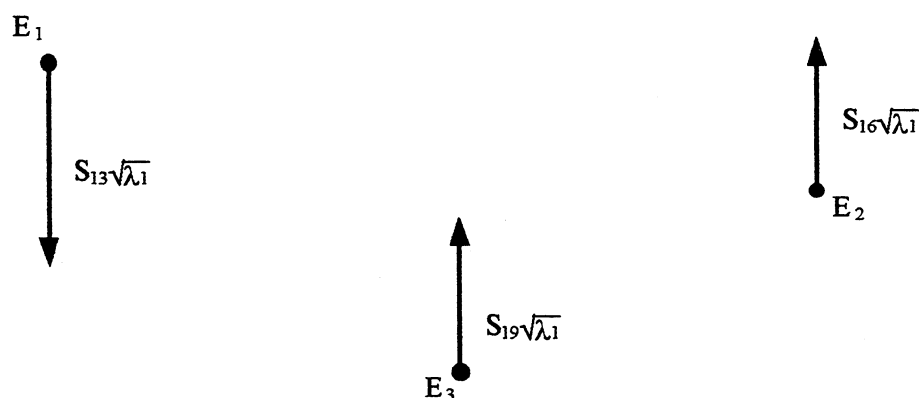


FIGURA 2.7 – ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE PRINCIPAL NO EIXO (Z)



Observa-se pelas figuras 2.6 e 2.7 que associa-se um componente do vetor $Y = S_{1j}\sqrt{\lambda_j}$ á cada coordenada. Deste modo, para a primeira estação a

componente $s_{11}\sqrt{\lambda_1}$ é a projeção do semi-eixo do elipsóide no eixo X_1 , $s_{12}\sqrt{\lambda_1}$ é a projeção desse elipsóide no eixo Y_1 e, $s_{13}\sqrt{\lambda_1}$ é a projeção desse elipsóide no eixo Z_1 e, assim sucessivamente para as demais estações. A resultante dessas projeções indicam a direção ao longo da qual existe “fraqueza” na rede geodésica (CROSILLA e MARCHESINI, 1983, p. 301-315),

2.4.1.3 Precisão de coordenada isolada

A medida de acurácia de coordenada isolada é o desvio padrão, dado por:

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_{x_i} &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{\sigma_{x_i x_i}} \\ \hat{\sigma}_{y_i} &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{\sigma_{y_i y_i}} , \\ \hat{\sigma}_{z_i} &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{\sigma_{z_i z_i}}\end{aligned}\tag{2.19}$$

em que $\hat{\sigma}_0$ é o desvio padrão a posteriori.

2.4.1.4 Precisão da posição

A precisão de posição no espaço bidimensional e tridimensional é definido, respectivamente, por (KUANG, 1996, p. 162):

$$\hat{\sigma}_{P_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\sigma_{x_i x_i} + \sigma_{y_i y_i}} = \sqrt{a^2 + b^2} ,\tag{2.20}$$

$$\hat{\sigma}_{P_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\sigma_{x_i x_i} + \sigma_{y_i y_i} + \sigma_{z_i z_i}} .\tag{2.21}$$

2.4.2 Medidas de Confiabilidade

As coordenadas de uma rede geodésica podem sofrer alterações, se os erros contidos nas observações não forem eliminados. Deste modo, as medidas de confiabilidade na rede geodésica desempenham importante papel, pois estas indicam o quanto as observações são confiáveis.

Normalmente, o teste de confiabilidade é utilizado com o objetivo de detectar possíveis erros não detectados em testes tradicionais, como por exemplo, o teste global, data snooping e tau (KUANG, 1996, p. 134).

A confiabilidade pode ser dividido em confiabilidade interna e externa, as quais estão associadas a elementos obtidos do teste data snooping de Baarda (BAARDA, 1968). Na seqüência, os conceitos de estimativas de confiabilidade interna e externa serão apresentados resumidamente.

2.4.2.1 Confiabilidade interna

A confiabilidade interna é a medida da capacidade da rede para detectar erros grosseiros com probabilidade $(1 - \beta_0)$ (LEICK, 1995, p. 167), ou seja, quantificar a menor porção do erro existente na observação que pode ser localizado com uma dada probabilidade (MORAES, 2001, p. 196).

Estima-se estatisticamente o valor mínimo do erro detectável na observação (l_i), pela equação:

$$\nabla l_{0_i} = \left| \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}} \sigma_{l_i} \right|, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2.22)$$

em que: δ_0 , σ_{l_i} e r_i são respectivamente, o parâmetro de não-centralidade, o desvio padrão da i -ésima observação e sua respectiva redundância parcial.

A matriz R, é uma matriz onde estão as redundâncias parciais (r_i), que pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$R = \frac{1}{\hat{\sigma}_0^2} \sum v P. \quad (2.23)$$

As redundâncias parciais (r_i), calculadas a partir da equação (2.23), são benéficas ao controle das observações. Estas grandezas variam de 0 a 1 (LEICK, 1995, p. 161-163). Os valores de redundância próximos de zero, podem indicar erros significativos, uma vez que o resíduo não reflete suficientemente o possível erro embutido na observação. Na tabela 2.2 estão os intervalos recomendados para a orientação da decisão sobre a controlabilidade de observações mediante as redundâncias parciais.

TABELA 2.2 – CONTROLE DE OBSERVAÇÕES POR MEIO DE REDUNDÂNCIAS PARCIAIS

INTERVALO	CONTROLABILIDADE
$0 \leq r_i < 0,01$	Não Há
$0,01 \leq r_i < 0,1$	Ruim
$0,1 \leq r_i \leq 0,3$	Suficiente
$0,3 \leq r_i < 1$	Boa

FONTE: MÜRLE e BILL (1984, P. 48) apud DE MORAES (2001, p. 200).

O parâmetro de não-centralidade (δ_0) é obtido por meio da distribuição normal reduzida, o qual pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\delta_0 = Z_{\frac{\alpha}{2}} - \theta_{\beta_0}^{-1}, \quad (2.24)$$

em que: $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ significa o valor crítico ao nível de significância α , valor este, que indica um dos limites do intervalo de confiança $(1-\alpha)$ e, $\theta_{\beta_0}^{-1}$ é a função de probabilidade inversa da distribuição normal reduzida (KUANG, 1996, p. 138). O valores de δ_0 se encontram tabelados em KUANG (1996, p. 140), os quais são apresentados na tabela

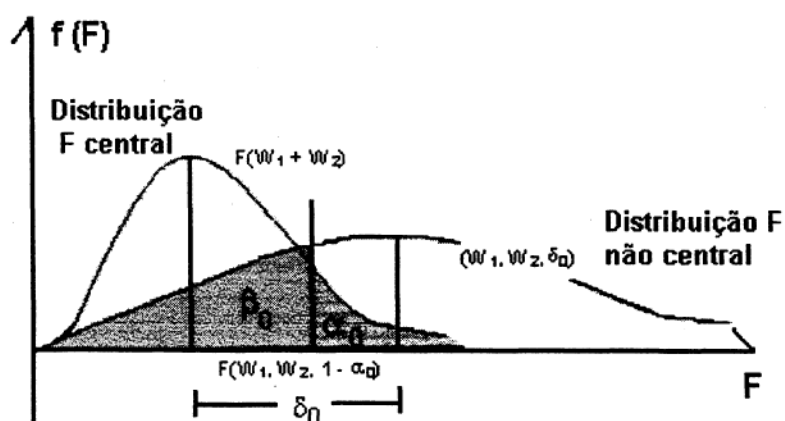
TABELA 2.3 – PARÂMETRO DE NÃO-CENTRALIDADE EM FUNÇÃO DO PODER DE TESTE $(1 - \beta_0)$ E NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (α_0)

Poder de Teste $(1 - \beta_0)$	Nível de Significância (α_0)			
	$\alpha_0 = 0,01\%$	$\alpha_0 = 0,10\%$	$\alpha_0 = 1\%$	$\alpha_0 = 5\%$
50%	3,72	3,29	2,58	1,96
70%	4,41	3,82	3,10	2,48
80%	4,73	4,13	3,42	2,80
90%	5,17	4,57	3,86	3,24
95%	5,54	4,94	4,22	3,61
99%	6,22	5,62	4,90	4,29
99,90%	6,98	6,38	5,67	5,05

FONTE: KUANG, 1996, p. 140.

A distribuição F central e não central e o parâmetro de não-centralidade estão representados na figura 2.8.

FIGURA 2.8 – DISTRIBUIÇÃO F CENTRAL, NÃO CENTRAL E PARÂMETRO DE NÃO-CENTRALIDADE



FONTE: LEICK, 1995, p. 165.

Pode-se observar pela equação 2.22 que ∇l_{0_i} depende de (FÖRSTNER², 1979, p. 68; BENNING³, 1983, p. 221 apud DE MORAES, 2001, p. 199):

- a) da precisão das observações, a qual é descrita pelo desvio padrão σ_{l_i} ;
- b) da geometria da rede, caracterizada pela redundância parcial r_i ;
- c) do nível de significância α ;
- d) da qualidade ou poder de teste, como por exemplo, a probabilidade para detectar a observação com erro grosseiro; e
- e) do parâmetro de não-centralidade (figura 2.8).

Em seguida estima-se o possível erro embutido nas observações, pela expressão:

$$\nabla l_i = \left| \frac{v_i}{r_i} \right|, (i = 1, \dots, n) \quad (2.25)$$

onde v_i é o resíduo da i-ésima observação.

Finalmente, compara-se a equação (2.22) com a equação (2.24). É provado estatisticamente que a observação (l_i) possui um erro significativo se (KUANG, 1996):

$$\nabla l_i \geq \nabla l_{0_i} \quad (2.26)$$

Maiores detalhes podem ser vistos em LEICK (1995), KUANG (1996) e MORAES (2001).

² FÖRSTNER, W (1974): Das Programm TRINA Zur Ausgleichung um Güntebeurteilung Geodästischer Lagenetze. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Stuttgart, v. 104, N. 2, p. 61-72.

³ BENNING, W. (1983): Tunneldurchschlagsprognosen Mittel Pseudostrecken. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Stuttgart, v. 108, N. 6, p. 220-226.

2.4.2.2 Confiabilidade externa

A confiabilidade externa trata somente da influência dos erros não detectáveis nas coordenadas dos pontos. Deste modo, o vetor das coordenadas X (equação II.8, ANEXO II) na presença de um erro grosseiro ∇l_i , é expresso por (MORAES, 2001, p. 201):

$$X = -NA^T P(L - l_i \nabla l_i) = -N^{-1} A^T P L + N^{-1} A^T P l_i \nabla l_i = -X + \nabla X, \quad (2.27)$$

em que:

$N \rightarrow$ matriz dos coeficientes das equações normais;

$A \rightarrow$ Matriz das derivadas das equações de observação em relação às incógnitas;

$P \rightarrow$ Matriz dos pesos das observações;

$L \rightarrow$ Vetor da diferença entre o vetor dos valores calculados e o vetor dos valores observados;

$l_i \rightarrow$ i-ésima coluna de uma matriz identidade $n \times n$.

Assim, o efeito do erro grosseiro ∇l_i no vetor solução é dado por:

$$\nabla X = N^{-1} A^T P l_i \nabla l_i \quad (2.28)$$

2.4.3 Medida de Sensibilidade

Em adição a acurácia, a confiabilidade e aos custos, as medidas de sensibilidade desempenham importante papel no controle da qualidade de redes geodésicas de monitoramento. Uma rede geodésica de monitoramento é caracterizada por um conjunto de estações, na qual são feitas observações em diferentes épocas, com vistas a detecção de deslocamentos. Deste modo, a análise geodésica dos deslocamentos baseia-se na avaliação de repetidas observações.

Para as redes geodésicas de monitoramento, deve ser examinado se o deslocamento dos objetos investigados são detectáveis (MORAES, 2001, p. 201).

Deste modo, em uma rede geodésica a medida de sensibilidade é um teste estatístico para detectar deslocamentos com probabilidades dadas a partir de observações em duas épocas (NIEMEIER e HOLMAN, 1984, p. 47).

Sejam duas épocas t_1 e t_2 , nas quais produzam os vetores \mathbf{X}_1 e \mathbf{X}_2 e as respectivas matrizes cofatoras de covariância Q_{X1} e Q_{X2} .

O vetor de deslocamentos é expresso por:

$$\mathbf{d} = \mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1, \quad (2.29)$$

e a matriz de cofatores de covariância do vetor \mathbf{d} , é expressa por:

$$Q_d = Q_{X1} + Q_{X2}, \quad (2.30)$$

A existência de deslocamento significativo de ponto entre as duas épocas, requer a formulação das hipóteses nula e alternativa:

$$H_0 : E\{\mathbf{d}\} = 0, \quad (2.31)$$

$$H_A : E\{\mathbf{d}\} \neq 0, \quad (2.32)$$

A estatística utilizada para testar a hipótese nula é baseada na distribuição F de Snedecor (PELZER, 1971), representada pela seguinte expressão:

$$F_0 = \frac{\mathbf{d}^T Q_d^{-1} \mathbf{d}}{R(Q_d) \bar{\sigma}_0^2}, \quad (2.33)$$

onde: $R(Q_d)$ significa a característica da matriz Q_d e, $\bar{\sigma}_0^2$ é a variância a posteriori única, dada por:

$$\bar{\sigma}_0^2 = \frac{W_1 \hat{\sigma}_1^2 + W_2 \hat{\sigma}_2^2}{W_1 + W_2}, \quad (2.34)$$

em que: W_1 e W_2 ; $\hat{\sigma}_1^2$ e $\hat{\sigma}_2^2$ representam respectivamente os graus de liberdade e as variâncias a posteriori referentes á primeira e á segunda campanhas.

O valor de F_0 é comparado ao valor teórico correspondente obtido pela tabela F de Snedecor. A hipótese nula será aceita se:

$$F_0 > F_{W_1, W_2, \alpha} . \quad (2.35)$$

Partindo do pressuposto que a hipótese nula não foi aceita, ou seja, que se conhece os deslocamentos, testa-se a hipótese alternativa, por meio da seguinte expressão:

$$F_A = \frac{d_A^T Q_d^{-1} d_A}{\bar{\sigma}_0^2} , \quad (2.36)$$

em que d_A é o provável deslocamento enunciado pela hipótese alternativa.

Esta estatística tem distribuição F de Snedecor não central, e baseia-se no parâmetro de não-centralidade (λ_0), expresso por:

$$\lambda_0 = \delta_0^2 . \quad (2.37)$$

Calculada a estatística associada a hipótese alternativa, o vetor d_A será detectável somente se:

$$F_A > \lambda_0 . \quad (2.38)$$

O critério de sensibilidade para redes geodésicas de monitoramento pode ser determinada pela resolução espectral da matriz Q_d , como se segue:

$$Q_d = S \Lambda S^T , \quad (2.39)$$

que fica,

$$\Sigma Q_d = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_u \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & \dots & \dots & \dots \\ s_2 & \dots & \dots & \dots \\ s_3 & \dots & \dots & \dots \\ s_u & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

em que λ_i é o valor próprio da matriz Q_d e s_i o seu correspondente vetor próprio.

Admitindo que os valores próprios $\lambda_i (i=1,2,\dots,u)$ estão em seqüência decrescente, com $\lambda_1 = \lambda_{\text{máx}}$ e $\lambda_u = \lambda_{\text{min.}}$, os vetores próprios correspondentes a λ_1 e λ_u , são s_1 e s_u respectivamente. Deste modo, pode-se obter, respectivamente, os deslocamentos máximos e mínimos detectáveis, como se segue:

$$d_{\text{máx.}}^o = \bar{\sigma}_o \delta_o \sqrt{\lambda_1} S_1, \quad (2.41)$$

$$d_{\text{min.}}^o = \bar{\sigma}_o \delta_o \sqrt{\lambda_u} S_u, \quad (2.42)$$

onde: $\bar{\sigma}_o$ representa o desvio padrão a posteriori único entre as campanhas e, δ_o é o parâmetro de não-centralidade.

2.4.3.1 Estimativa dos Deslocamentos

O modelo matemático utilizado para estimar os deslocamentos é expresso por (CHYZANOWSKI, et. al, 1986, p. 15 – 19 apud XAVIER, 2000, p. 38 – 39):

$$d_{\text{obs}} + V = Bd \quad (2.43)$$

onde: d_{obs} representa o vetor das diferenças das observações entre as campanhas analisadas, B a matriz modelo de deslocamento e d , o vetor dos deslocamentos estimados (parâmetros).

Esta metodologia baseia-se no processo dos mínimos quadrados, modelo paramétrico (seção 2.2).

O vetor (d_{obs}) é expresso por:

$$d_{obs} = L_2^a - L_1^a \quad (2.44)$$

onde: L_2^a e L_1^a representam, respectivamente, as observações ajustadas da primeira e segunda épocas. A matriz (B) contém elementos unitários correspondentes às instabilidades das observações ajustadas entre duas épocas. No trabalho proposto, esta matriz foi expressa por:

$$B = \begin{bmatrix} & 1 & 0 & 0 \\ \text{PARA} & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 0 \\ \text{KM03} & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

onde: PARA e KM03, são as estações base utilizadas para o posicionamento das estações relativas, no trabalho proposto.

Na metodologia empregada para estimar os deslocamentos, a matriz dos pesos das observações única ($P_{d_{obs}}$) é estimada em função das matrizes dos pesos da primeira e segunda campanhas, e expressa por:

$$P_{d_{obs}} = P_2 - [P_2(P_1 + P_2)^{-1}P_2] = P_1(P_1 + P_2)^{-1}P_2 = (P_1^{-1} + P_2^{-1})^{-1}, \quad (2.46)$$

onde: P_1 e P_2 representam, respectivamente, as matrizes dos pesos referentes a primeira e segunda campanhas.

Através destes dados, os deslocamentos podem ser estimadas utilizando-se a seguinte expressão:

$$d = (B^T P_{d_{obs}} B)^{-1} B^T P_{d_{obs}} d_{obs} . \quad (2.47)$$

As matrizes variância-covariância (Σ_d) e cofatora (Q_d), geradas pelo ajustamento dos deslocamentos, são expressas por:

$$\Sigma_d = \bar{\sigma}_0^2 (B^T P_{d_{obs}} B)^{-1} e, \quad (2.48)$$

$$Q_d = (B^T P_{d_{obs}} B)^{-1}. \quad (2.49)$$

Para verificar se os deslocamentos estimados são significativos, enuncia-se a hipótese nula, expressa por:

$$H_0 : d_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.50)$$

A partir da hipótese nula, formula-se a estatística correspondente F_0 , baseada na distribuição F central de Snedecor e expressa por:

$$F_0 = \frac{d_i^2}{[q_{di}](\bar{\sigma}_0^2)} < F[m_{di}, (W_1 + W_2), \alpha] , \quad (2.51)$$

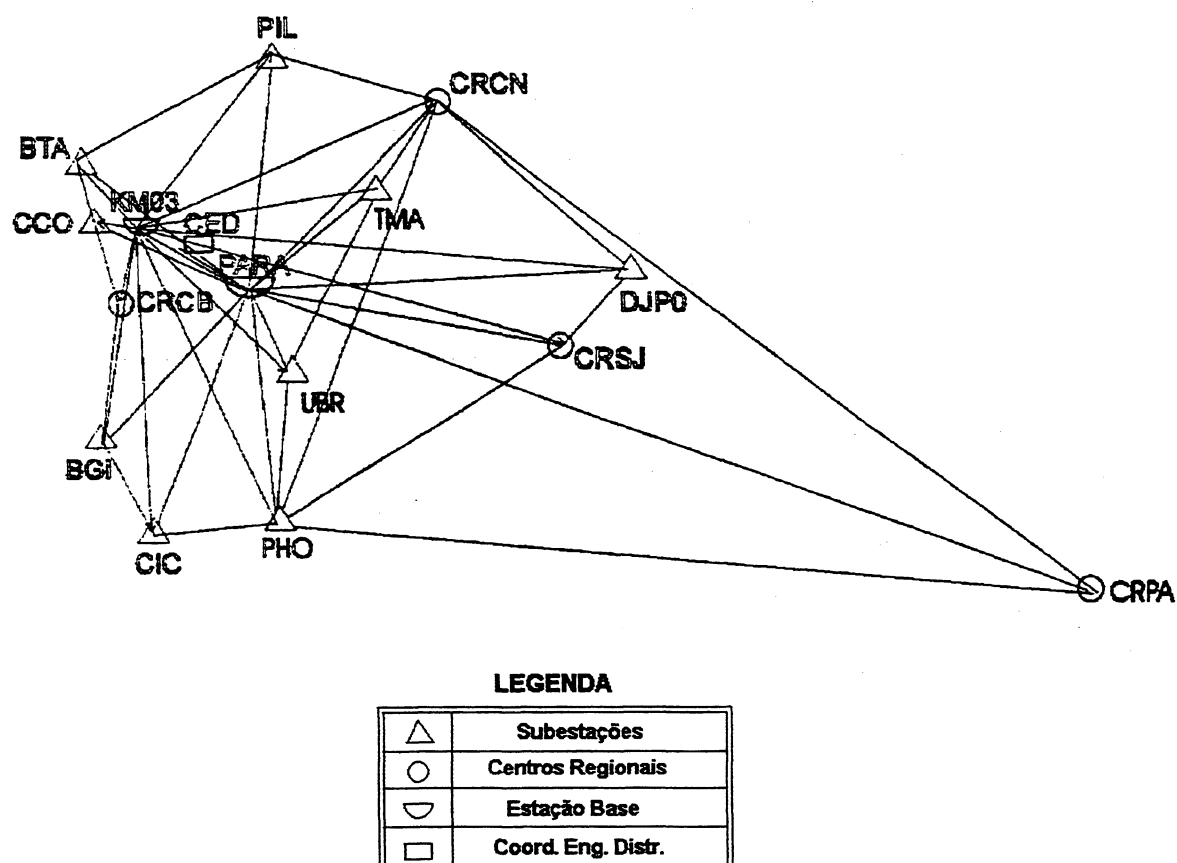
onde: q_{di} e σ_{di}^2 significam respectivamente o elemento da matriz cofatora (Q_d) e a variância do deslocamento estimado e m_{di} , a dimensão do vetor correspondente a este deslocamento. Por exemplo, a dimensão do vetor correspondente ao deslocamento da componente $X(\Delta_X)$ é igual a 1.

A estatística enunciada pela hipótese nula tem que obedecer a condição (2.51). Caso isto não ocorra, a hipótese nula é descartada, ou seja, é provado estatisticamente que os deslocamentos analisados são significativos a um nível de confiança $(1 - \alpha)$.

3 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Com o propósito de atingir os objetivos descritos na seção 1.2, foi realizado um experimento com o GPS na rede geodésica GPS/COPEL (ver seção 3.1), a qual esta representada na figura 3.1, no período de 16 a 24 de julho de 2001. A tabela 3.1 apresenta a descrição das estações da rede, com suas respectivas localidades.

FIGURA 3.1 – REDE GEODÉSICA GPS/COPEL



FONTE: CUNHA, 1997, p.22.

TABELA 3.1 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DA REDE GEODÉSICA GPS/COPEL

ESTAÇÃO	DESCRIÇÃO	BAIRRO	CIDADE
PARA	UFPR	Jardim das Américas	Curitiba
KM03	Prédio da COPEL	Campo Comprido	Curitiba
UBR	Subestação Uberaba	Uberaba	Curitiba
TMA	Subestação Tarumã	Tarumã	Curitiba
PHO	Subestação Pinheirinho	Pinheirinho	Curitiba
CIC	Subestação Cidade Industrial	Cidade Industrial	Curitiba
CCO	Subestação Campo Comprido	Campo Comprido	Curitiba
BGI	Subestação Barigüi	Barigüi	Curitiba
DJPO	Fábrica da Renault	Distrito Industrial	S. J. dos Pinhais
CRSJ	Prédio do Centro Regional	Centro	S. J. dos Pinhais
PIL	Subestação Pilarzinho	Pilarzinho	Curitiba
CRCN	Prédio do Centro Regional	Atuba	Curitiba
CED	Prédio da Coordenadoria	Centro	Curitiba
BTA	Subestação Bateias	Distrito de Bateias	Colombo
CRPA	Prédio do Centro Regional	Centro	Paranaguá
CRCB	Prédio da Superintendência	Santa Quitéria	Curitiba

FONTE: CUNHA, 1997, p. 23.

Esta rede foi implantada com o objetivo de que suas estações servissem de referência para levantamentos cadastrais com o GPS de postes e de linhas de transmissão a serem realizados pela COPEL. Quando na determinação dos locais de materialização destas estações, foram observados os seguintes fatores:

- configuração geométrica das estações da rede, evitando configurações deficientes que degradassem a eficiência da modelagem matemática quando no processamento e/ou ajustamento;
- escolha de locais com horizonte desobstruídos, minimizando o efeito de multicaminhamento e a degradação da precisão na determinação da posição da estação;

- ausência de antenas de rádio-transmissão, linhas de transmissão de alta-tensão;
e
- fácil acesso, segurança e estabilidade do local.

No entanto, é importante salientar, que visando a redução nos gastos com pessoal (equipe de campo no cadastro) nos levantamentos cadastrais, os fatores segurança e facilidade de acesso as estações, tiveram grande consideração quando na determinação dos locais de materialização, optando-se pela materialização no âmbito de subestações e prédios dos Centros Regionais da COPEL. Nas subestações os marcos foram implantados diretamente no solo, onde foi determinado pelo setor de obras da COPEL um padrão para a construção destes marcos e posteriormente submetido ao corpo técnico do IBGE, que implementou alguns detalhes e aprovou o padrão de construção. Nos prédios dos centros regionais os marcos foram materializadas em pilares de centragem forçada. A tabela 3.2 mostra as estações, cujos marcos foram implantados diretamente no solo e os materializados em pilares de centragem forçada.

**TABELA 3.2 – LOCAIS DE MATERIALIZAÇÃO DOS MARCOS DA REDE
GEODÉSICA GPS/COPEL**

ESTAÇÕES	MATERIALIZAÇÃO DOS MARCOS
UBR; TMA; PHO; CIC; CCO; BGI; DJPO; PIL e BTA;	NO SOLO
PARA; KM03; CRSJ; CRCN; CED; CRPA e CRCB	PILAR DE CENTRAGEM FORÇADA

Deste modo, ou seja, pelo fato destas estações localizarem-se próximas a subestações e linhas de transmissão, elas se tornam propícias a que efeitos oriundos da localização se manifestem. É importante ressaltar, também, que as estações materializadas diretamente sobre o solo, estão sujeitas ao efeito da instabilidade do solo e do tripé, os quais conduzem a erros no posicionamento (seção 2.1.3). As figuras, 3.2 a 3.7, mostram algumas destas estações.

FIGURA 3.2 – ESTAÇÃO BGI

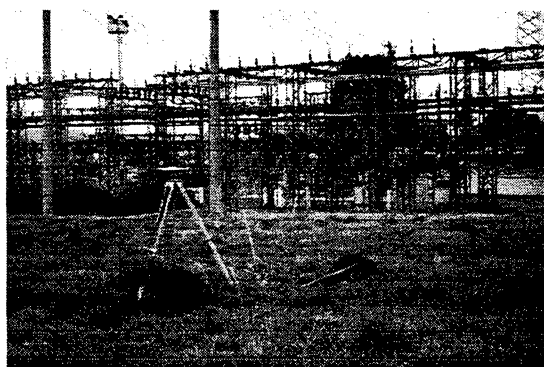


FIGURA 3.3 – ESTAÇÃO UBR



FIGURA 3.4 – ESTAÇÃO PHO

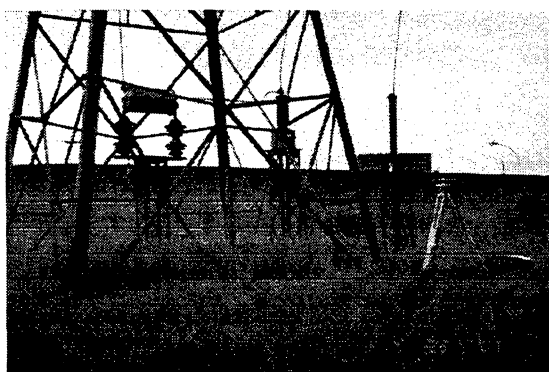


FIGURA 3.5 - ESTAÇÃO PIL

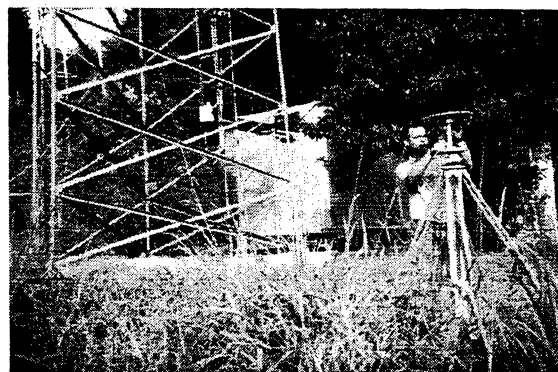


FIGURA 3.6 – ESTAÇÃO BTA

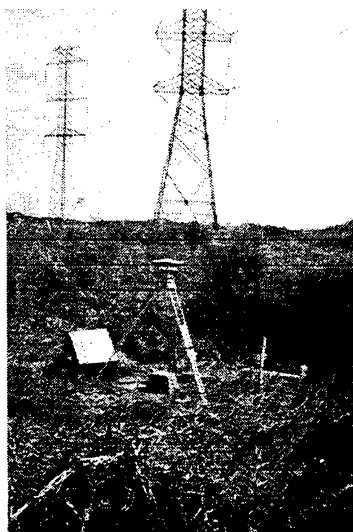
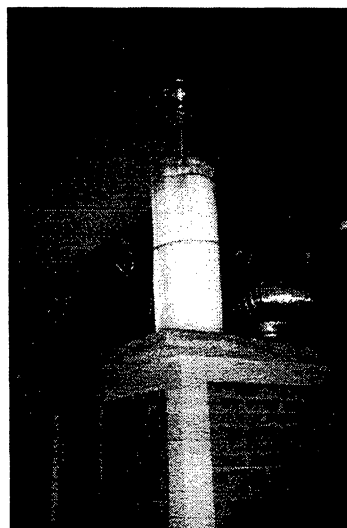


FIGURA 3.7 – ESTAÇÃO CRCB



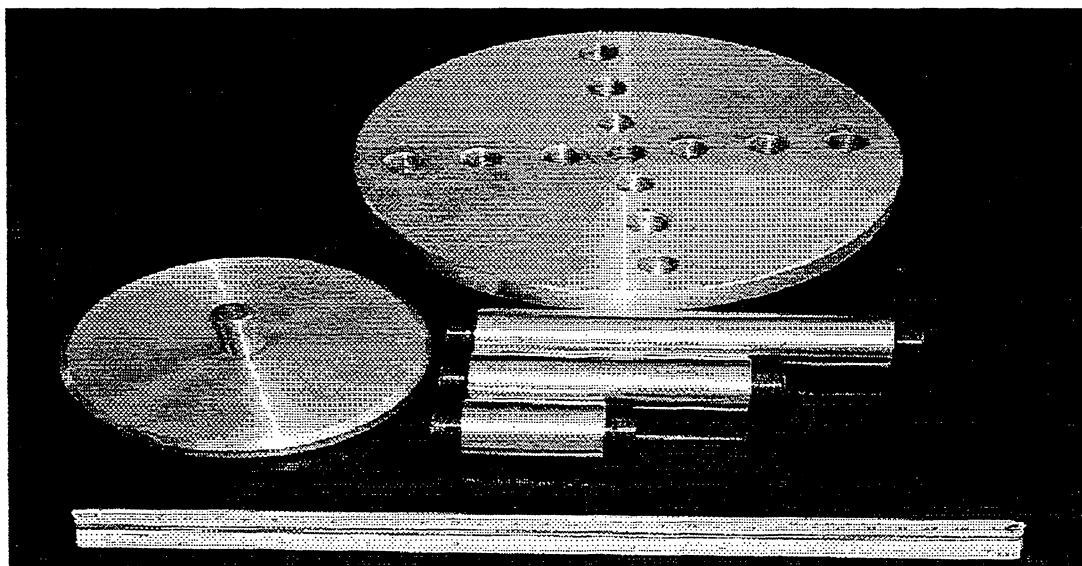
Para a execução deste trabalho, utilizou-se então, o arcabouço de estações que compõem esta rede (com exceção da estação CED que foi desativada e, devido a razões logísticas a estação CRPA também não foi utilizada, bem como a estação DJPO, pelo fato de mesmo se encontrar sob uma torre de alta-tensão, e portanto mais propícia as interferências sobre o sinal transmitido pelos satélites), cujo planejamento e metodologia de campo serão descritos na sequência.

3.1 PLANEJAMENTO

Foi planejado um experimento que consta de duas épocas (1ª época e 2ª época) GPS na referida rede, obtendo-se então dois conjuntos de dados, os quais, foram utilizados posteriormente na análise do desempenho do GPS na detecção de deslocamento vertical.

No entanto, esta análise baseia-se em um estudo simulado. Deste modo, os deslocamentos verticais verificados nas estações relativas, não são provenientes de efeitos naturais e/ou artificiais similares, como por exemplo, subsidência de grandes barragens, deslizamento de terra e afundamento de cidades, e sim, deslocamentos impostos por meio do dispositivo “Base para Deformações”. O dispositivo “Base para Deformações” acompanhado de três cilindros são mostrados na figura 3.8.

FIGURA 3.8 – DISPOSITIVO “BASE PARA DEFORMAÇÕES”



Este dispositivo, projetado para simular deslocamentos verticais, foi construído com alumínio de alta qualidade e, possui coeficiente de dilatação desprezível para os propósitos deste trabalho. Simulação de deslocamentos verticais, tanto negativos como positivos, de 5 cm, de 10 cm e de 15 cm, ou com valores próximos a estes, são possíveis com este dispositivo.

3.2 METODOLOGIA DE CAMPO

3.2.1 Equipamentos Utilizados

Todos os equipamentos utilizados para a realização das campanhas pertencem a UFPR, os quais são:

- 2 receptores Ashtech Z-XII e, 1 TRIMBLE SSI com todos os seus acessórios;
- 2 *notebooks* Pentium;
- programa PRISM da ASHTECH;
- programas (Hose e Datalogr), para a descarga dos dados;
- Dispositivo “Base para Deformações”;
- 1 paquímetro, cuja precisão nominal é de 0,05 mm;
- 2 tripés;
- 1 conjunto de baterias, 2 carregadores e 1 verificador de carga;
- 1 psicrômetro;
- 1 barômetro;
- 1 Kombi pertencente ao CENTRAN (Central de Transportes) / UFPR; e
- equipe de campo: 3 pessoas.

3.2.2 Técnica de Levantamento

Na área em estudo, conforme indicado na figura 3.1, foram realizados posicionamentos com a técnica estática empregando-se Três receptores

geodésicos, citados na seção 3.2.1. Utilizou-se uma taxa de coleta de dados de 15 segundos, ângulo de elevação mínimo de 15 graus e período de ocupação em cada estação conforme indicado na tabela 3.3.

TABELA 3.3 – PERÍODO DE OCUPAÇÃO EM CADA ESTAÇÃO

ESTAÇÃO	PERÍODO DE OCUPAÇÃO	ESTAÇÃO	PERÍODO DE OCUPAÇÃO
CRSJ	120 min.	PHO	90 min.
CIC	90 min.	BGI	90 min.
CRCB	60 min.	CCO	90 min.
BTA	150 min.	TMA	90 min.
UBR	90 min.	PIL	60 min.
CRCN	120 min.		

A duração de rastreio em cada estação, foi definida segundo as especificações e normas do IBGE para levantamentos GPS, quando da definição, utilizou o critério comprimento das linhas de base (IBGE, 1998, p. 33), conforme tabela 3.4.

TABELA 3.4 – DURAÇÃO DE RASTREIO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE

COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE	DURAÇÃO DO RASTREIO
< 20 km	1 hora
< 50 km	2 horas
< 100 km	4 horas

FONTE: IBGE, 1998, p. 33.

Para o posicionamento das estações relativas (tabela 3.3), foram utilizadas duas estações base, a KM03 e a PARA, sendo esta pertencente a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). No entanto, as estações relativas BGI e CIC foram posicionadas, somente em relação a estação base PARA. Isso ocorreu devido ao fato de que não foi possível ocupar a estação KM03, quando na data planejada para o rastreio simultâneo destas duas estações relativas. A estação KM03 foi posicionada em função da estação PARA, com uma taxa de coleta de dados de 15 segundos, ângulo de elevação mínimo de 15 graus e duração de rastreio de 12

horas. O pós-processamento foi realizado no programa PRISM da ASHTECH (seção 4.1) utilizando a frequência L1. Os desvios padrão em X, Y e Z (WGS-84) da estação KM03, foram respectivamente, $\sigma_x = 0,005466$ m, $\sigma_y = 0,006860$ m e $\sigma_z = 0,004447$ m. Os desvios padrão em X, Y e Z (WGS-84) da estação PARA são $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0,0040$ m. A tabela 3.5 mostra as linhas de base formadas com seus respectivos comprimentos e, a tabela 3.6 apresenta as coordenadas cartesianas e geodésicas das estações base, PARA e KM03.

TABELA 3.5 – COMPRIMENTO DAS LINHAS DE BASE

ESTAÇÃO BASE	ESTAÇÃO RELATIVA	COMPRIMENTO LINHA DE BASE (KM)
PARA	UBR	3,838
	TMA	3,519
	PHO	10,899
	CIC	13,303
	CCO	14,098
	BGI	11,775
	CRSJ	10,362
	PIL	9,523
	CRCN	6,937
	CRCB	7,875
	BTA	30,391
KM03	UBR	14,149
	TMA	14,068
	PHO	12,998
	CIC	10,364
	CCO	2,894
	BGI	5,139
	CRSJ	18,753
	PIL	9,378
	CRCN	15,001
	CRCB	4,699
	BTA	19,238

**TABELA 3.6 – COORDENADAS CARTESIANAS E GEODÉSICAS DAS ESTAÇÕES
BASE (WGS-84)**

ESTAÇÃO	X (m)	Y (m)	Z (m)
PARA	3.763.751, 6390	- 4.365.113, 7680	- 2.724.404, 7550
KM03	3.755.866, 7776	- 4.372.870, 2233	- 2.722.920, 3332
	Latitude	Longitude	Alt. Geométrica (m)
PARA	- 25° 26' 54, 12910"	- 49° 13' 51, 43680"	925,759
KM03	- 25° 26' 00, 30113"	- 49° 20' 26, 35459"	952, 707

Cada estação ocupada era devidamente centrada, nivelada e orientada para o norte magnético. Em cada uma delas foram realizadas no mínimo três medidas da altura da antena em diferentes posições, tendo como altura final, a média aritmética destas medidas.

Os dados coletados, em cada estação, eram descarregados em um *notebook*, especificamente em diretórios referentes a cada estação. O receptor posicionado na estação base KM03, estava ligado diretamente a um *notebook*, sendo os dados coletados e descarregados *on-line*. Outras informações, tais como: altura da antena, início e fim do rastreamento também foram armazenados em cadernetas de campo (ANEXO I). Todas as baterias utilizadas durante um dia de trabalho eram devidamente carregadas e conferidas no dia seguinte. Em cada estação, foram coletados, também, os dados meteorológicos (temperatura seca e úmida e, pressão). A metodologia descrita nesta seção foi utilizada nas duas épocas.

3.2.3 Procedimentos para Simulação dos Deslocamentos Verticais

Para simulação dos deslocamentos verticais nas estações relativas, utilizou-se o dispositivo "Base para Deformações" acoplado na antena GPS, logo após estas estarem devidamente centradas e niveladas. Este dispositivo é acompanhado de 3 cilindros de alumínio (raio de 1,5 cm), com comprimentos de 5 cm, 10 cm e 15 cm, respectivamente, permitindo então, a simulação de deslocamentos verticais com estes valores, ou bem próximos destes. Em algumas estações não se impôs deslocamento vertical, com o objetivo de se verificar a repetibilidade de medidas do GPS. Neste caso, os três cilindros não são utilizados.

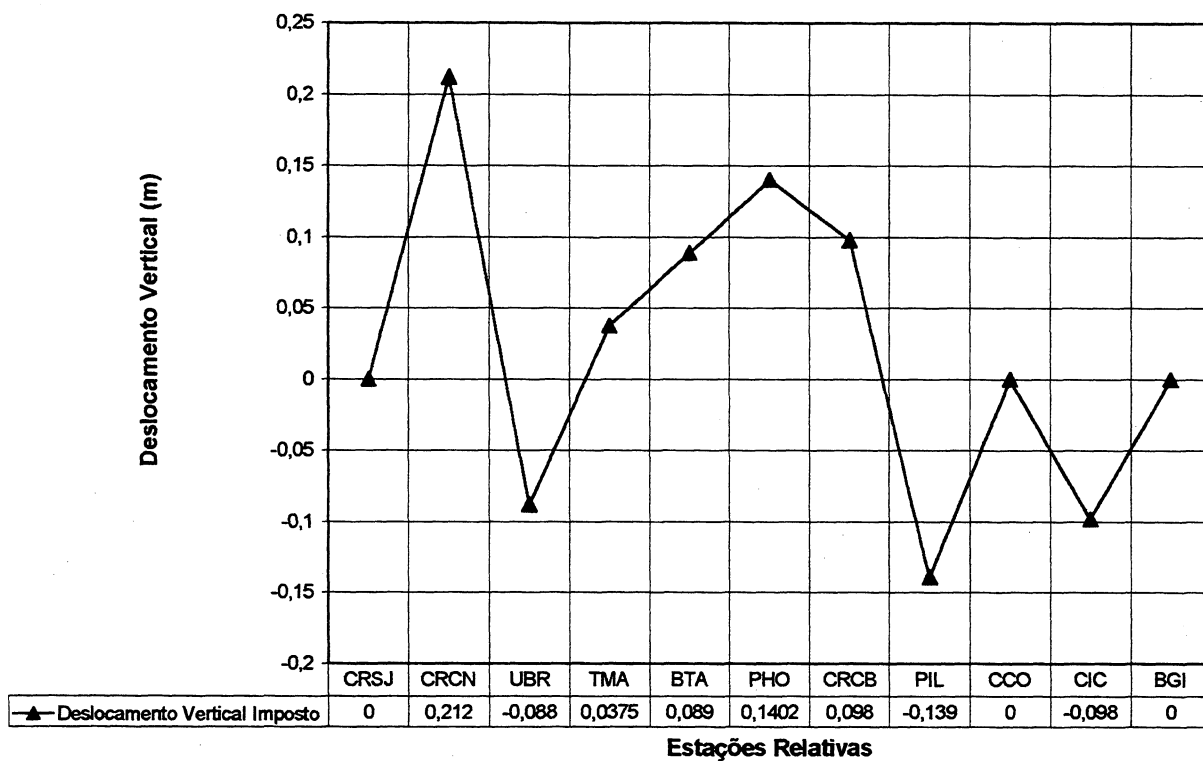
Das 11 estações relativas da rede GPS/COPEL utilizadas neste trabalho em cinco estações impôs-se deslocamentos verticais positivos (CRCN, BTA, TMA, PHO e CRCB), em três estações deslocamentos verticais negativos (UBR, PIL e CIC) e, em outras três estações não se impôs nenhum deslocamento (CRSJ, CCO e BGI).

Quando deslocamentos verticais positivos, na primeira época de observação acoplava-se a antena GPS diretamente sobre a base do dispositivo, pelo período de rastreio conforme indicado na tabela 3.3. Logo em seguida, colocou-se um dos três cilindros sobre a base do dispositivo (conforme magnitude de deslocamento a se impor: 5 cm, 10 cm ou 15 cm, ou valores próximos a estes) e, acoplava-se a antena GPS na ponta superior deste cilindro, rastreando por igual período ao da 1ª época, caracterizando assim, a 2ª época.

No caso de deslocamentos verticais negativos, na 1ª época colocava-se um dos três cilindros (conforme magnitude de deslocamento a se impor: -5 cm, -10 cm ou -15 cm, ou valores próximos a estes) sobre a base do dispositivo e, acoplava-se a antena GPS no bordo superior deste cilindro, rastreando-se então, pelo período de tempo especificado na tabela 3.3. Logo em seguida, dava-se início a 2ª época de observação, retirando-se o cilindro colocado e acoplando-se a antena GPS diretamente na base do dispositivo, rastreando-se por igual período ao da 1ª época.

A diferença entre a altura final da antena na 1ª época e na 2ª época, representa o deslocamento vertical imposto em cada estação relativa. No entanto, estes deslocamentos foram medidos, também, com um paquímetro. A figura 3.9 apresenta os deslocamentos impostos nas estações relativas, onde o eixo das abscissas representa as estações e o eixo das ordenadas os valores dos respectivos deslocamentos.

FIGURA 3.9 – DESLOCAMENTO VERTICAL IMPOSTO NAS ESTAÇÕES RELATIVAS



4 PROCESSAMENTO E AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES

4.1 PROGRAMA UTILIZADO

Os dados coletados, conforme descrito no capítulo 3, foram pós-processados utilizando-se o programa comercial PRISM da ASHTECH Inc.. Foi empregado o módulo de processamento estático deste programa. Maiores detalhes podem ser vistos em CARVALHO (99, p. 57-72) e ASHTECH (1994).

4.1.2 Processamento Utilizando o PRISM

Realizou-se o processamento da observável L_1 e, também, da combinação linear WIDE LANE. No entanto, quando a linha de base envolvia a estação base PARA, a resolução das ambigüidades foi realizada utilizando apenas a fase da portadora L_1 . Isto se deve ao fato de que a versão do programa PRISM, disponível no LAGE/UFPR, não permite conversão total dos dados RINEX para o formato bruto (ASHTECH), inviabilizando a realização de combinações lineares em face da ausência da fase da portadora L_2 . Esta versão, também não permite a utilização de efemérides precisas no processamento dos dados GPS, bem como, a entrada de dados meteorológicos (temperatura seca e úmida, e pressão). É importante ressaltar que estas limitações, não são inerentes do programa, mas apenas da versão disponível no LAGE/UFPR, devido a necessidade de atualização.

Com o objetivo de solucionar as ambigüidades e as coordenadas precisas, o programa PRISM usa o seguinte procedimento de cálculo:

- a) realiza uma tripla diferença de fase para identificar os saltos de ciclos e para determinar as coordenadas preliminares das estações relativas;
- b) posteriormente emprega a dupla diferença de fase fixando as ambigüidades para números não inteiros, gerando a chamada solução flutuante; e
- c) por último, realiza novamente uma dupla diferença de fase fixando as ambigüidades para números inteiros, quando possível, gerando a solução fixa.

4.1.2.1 Combinações lineares entre fases

As combinações lineares entre as fases ϕ_{L1} e ϕ_{L2} possuem a forma geral (WÜBBENA, 1989 apud SANTOS, 1994):

$$\phi_L = n\phi_{L1} + m\phi_{L2}, \quad (4.1)$$

onde: n e m , são números inteiros, ϕ_L é a fase resultante da combinação linear, expressa em ciclos.

4.1.2.1.1 Combinação linear Wide Lane

De acordo com SANTOS (1995), a combinação Wide Lane é definida quando $n=1$ e $m=-1$, resultando em:

$$\phi_{LW} = \phi_{L1} - \phi_{L2} \quad (4.2)$$

onde: ϕ_{LW} é a fase resultante da combinação linear Wide Lane; ϕ_{L1} é a fase da portadora L_1 ; ϕ_{L2} é a fase da portadora L_2 e, m e n são números arbitrários.

4.1.2.1.2 Combinação linear Narrow Lane

A combinação linear Narrow Lane é definida quando $n=1$ e $m=1$, resultando em:

$$\phi_{Ln} = \phi_{L1} + \phi_{L2} \quad (4.3)$$

onde: ϕ_{Ln} é a fase resultante da combinação linear Narrow Lane.

4.1.2.1.3 Combinação linear livre do atraso ionosférico

A combinação linear livre do atraso ionosférico, conhecida na literatura como combinação linear L_C ou L_3 (LEICK, 1995), é definida quando $n=1$ e $m = -\frac{f_{L1}}{f_{L2}}$, resultando em:

$$\phi_{L_C} = \phi_{L1} - \frac{f_{L1}}{f_{L2}} \phi_{L2}, \quad (4.4)$$

onde: ϕ_{L_C} é a fase resultante da combinação linear livre do atraso ionosférico e, f_{L_i} é a frequência da fase da portadora L_i , sendo $i=1, 2$.

4.1.3 Análise dos Resíduos da Dupla Diferença de Fase da Portadora

Antes do processamento das linhas de base atentou-se pelos resíduos da dupla diferença de fase da portadora $L1$, para todos os satélites rastreados, em todas as estações. Os resíduos mais elevados foram os das estações, UBR e BTA, nas duas épocas de rastreamento, como mostra os gráficos 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

GRÁFICO 4.1 – RESÍDUOS DE DUPLA-DIFERENÇA DA PORTADORA L1 PARA OS SATÉLITES PRN 06, 09, 10, 15, 17, 24, 25 E 30, EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 05 DA BASE KM03 – UBR (1ª ÉPOCA)

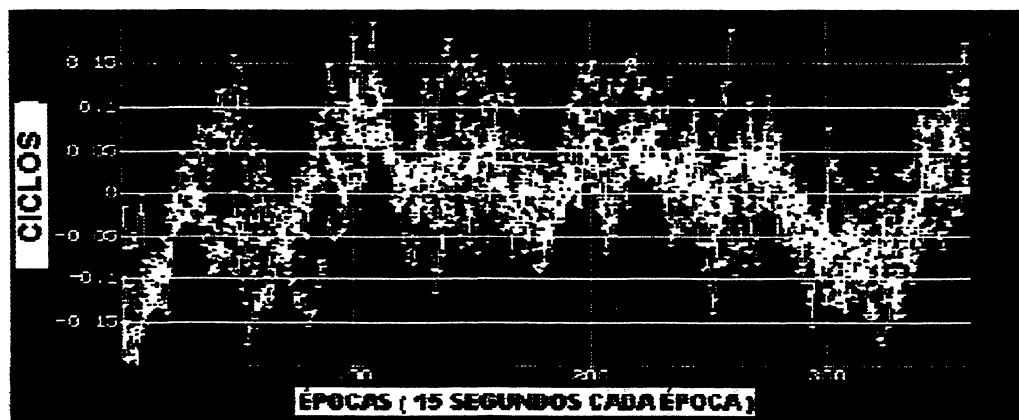


GRÁFICO 4.2 – RESÍDUOS DE DUPLA-DIFERENÇA DA PORTADORA L1 PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06, 10, 15, 17, 18, 23 E 24, EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 30 DA BASE KM03 – UBR (2ª ÉPOCA)

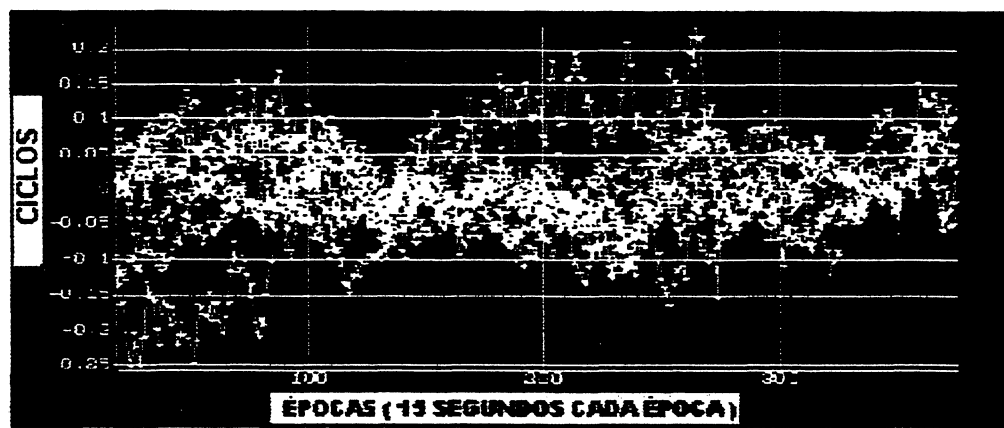


GRÁFICO 4.3 – RESÍDUOS DE DUPLA-DIFERENÇA DA PORTADORA L1 (via L_c) PARA OS SATÉLITES PRN 02, 04, 05, 07, 08, 09 E 24, EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 26 DA BASE KM03 – BTA (1ª ÉPOCA)

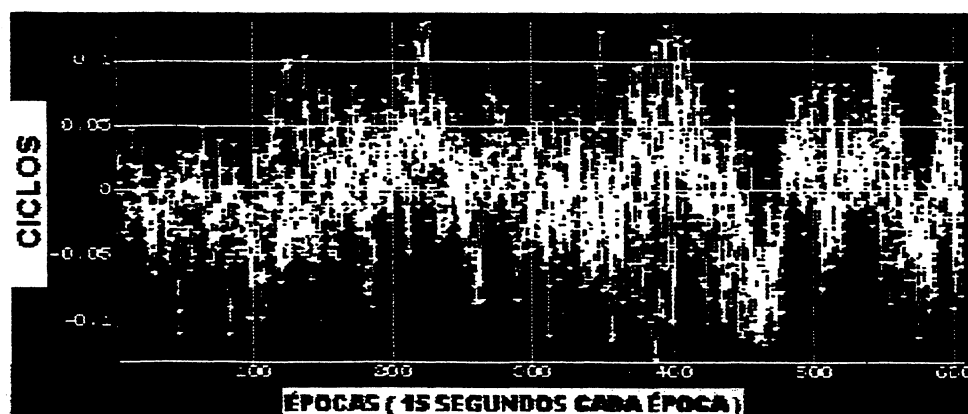
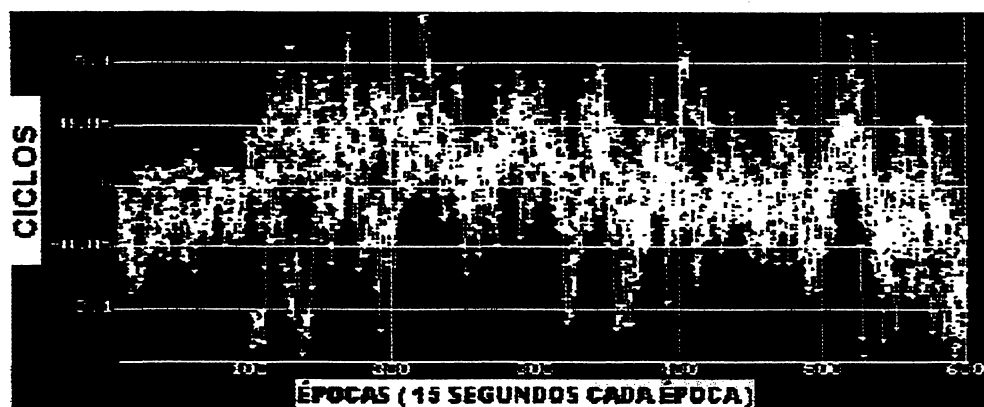


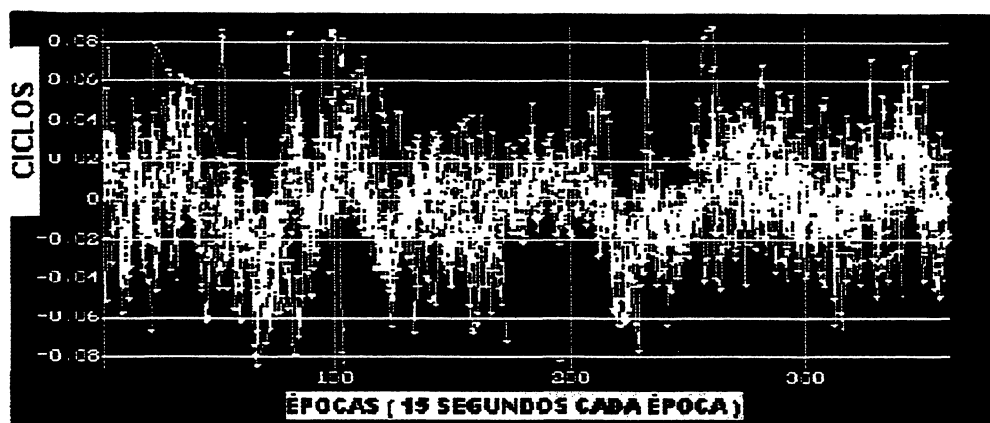
GRÁFICO 4.4 – RESÍDUOS DE DUPLA-DIFERENÇA DA PORTADORA L1 (via L_c) PARA OS SATÉLITES PRN 04, 05, 06, 10, 17, 24 E 30, EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 09 DA BASE KM03 – BTA (2ª ÉPOCA)



A estação KM03 está localizada no centro de treinamento da COPEL; a estação UBR (FIGURA 3.3) está localizada próxima a circuitos e, sob linhas de alta tensão da subestação Uberaba e, a estação BTA (FIGURA 3.6) está localizada sob linhas de transmissão na subestação Bateias. Os resíduos da dupla diferença da portadora da portadora L1 da linha base KM03-BTA variam, nas duas épocas entre ± 10 cm, enquanto que os da linha base KM03-UBR variam entre ± 15 cm na 1ª época e, -25 cm a +20 cm na 2ª campanha. Pode-se observar pelos gráficos 4.3 e 4.4 que os resíduos da dupla diferença da portadora da portadora L1 da estação BTA na época tiveram uma menor variação em relação a 1ª época, entre as épocas 0 a 100 e 300 a 500. O motivo destes resíduos serem altos, pode-se atribuir a localização destas estações, pois os efeitos da refração atmosférica e sincronismo dos relógios, são iguais para as demais estações rastreadas simultaneamente. Deste modo, o efeito provocado pelo multicaminhamento, ou seja, por reflexões dos sinais na estrutura da torre e/ou o efeito provocado pela localização da antena diretamente sob a linha de transmissão de alta voltagem, são os principais causadores da alta destes resíduos. De acordo com CUNHA (1997) este último efeito poderia provocar interferência oriunda do campo eletromagnético irradiado da linha de transmissão, possivelmente acarretando numa variação do centro de fase da antena, o que provocaria um erro sistemático na determinação da fase, erro este que propagaria na determinação final da posição.

Os resíduos da dupla diferença da fase da portadora L1 da estação CCO (± 8 cm) são menores que os das estações UBR e BTA, conforme pode ser visto no gráfico 4.5.

GRÁFICO 4.5 – RESÍDUOS DE DUPLA-DIFERENÇA DA PORTADORA L1 PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06, 15, 17, 18, 21, 22, 25 E 30, EM RELAÇÃO AO SATÉLITE PRN 23 DA BASE KM03 – CCO (1ª ÉPOCA)



Estes resíduos são considerados satisfatórios (quando comparados aos das estações UBR e BTA), uma vez que esta estação está localizada próxima a torres de alta tensão, sob linhas de transmissão de 138 KV e, aproximadamente, a 3 m de uma cerca de arame farpado. Os resíduos das demais linhas de base tem uma variação semelhante ao da linha base KM03-CCO.

Com estas análises, na fase do processamento da linha de base, retirou-se os satélites que apresentavam os maiores resíduos, mudou-se, também os satélites base, com o objetivo de melhorar a precisão das coordenadas X, Y, Z. No entanto, não verificou-se uma melhora da precisão das coordenadas (X, Y, Z), utilizando estas estratégias. Aqui, é importante salientar, que todas as linhas de base tiveram as ambigüidades resolvidas e fixadas..

4.1.4 Desvios Padrão das Coordenadas X, Y, Z

A seguir, apresentam-se os gráficos com os desvios padrão das coordenadas X, Y, Z (WGS-84) das linhas bases formadas entre as estações base e as estações relativas.

GRÁFICO 4.6 – DESVIO PADRÃO EM X, Y, Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO PARA, 1ª ÉPOCA

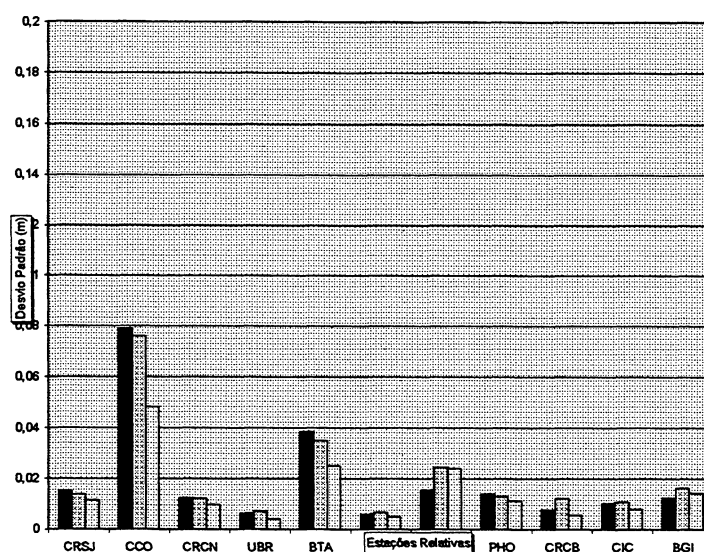


GRÁFICO 4.7 – DESVIO PADRÃO EM X, Y, Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO PARA, 2ª ÉPOCA

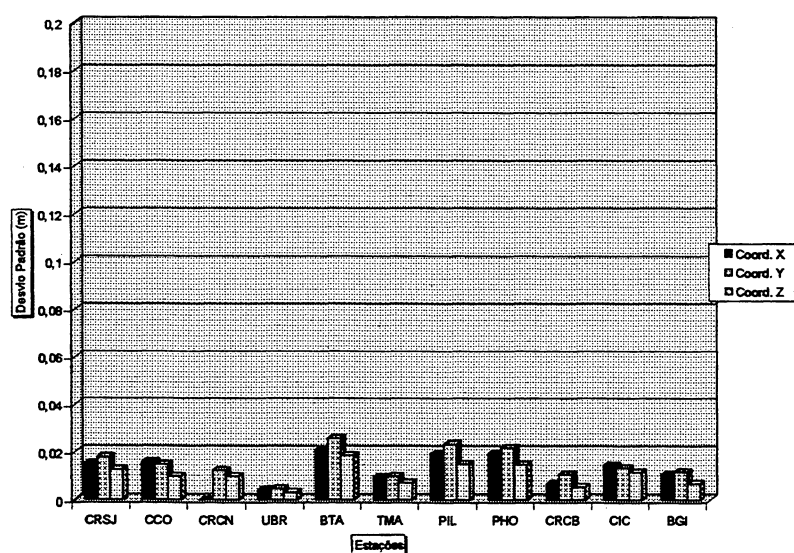


GRÁFICO 4.8 – DESVIO PADRÃO EM X, Y, Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO KM03, 1ª ÉPOCA

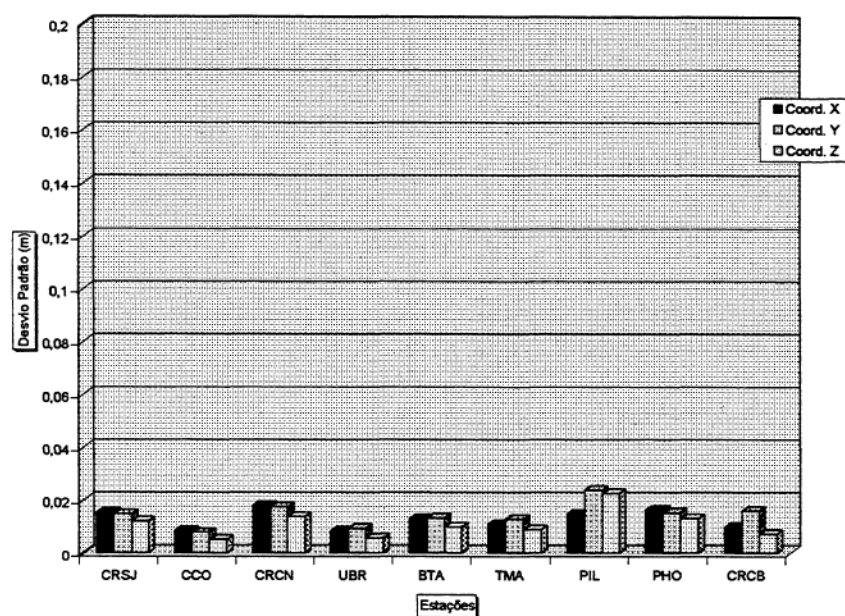
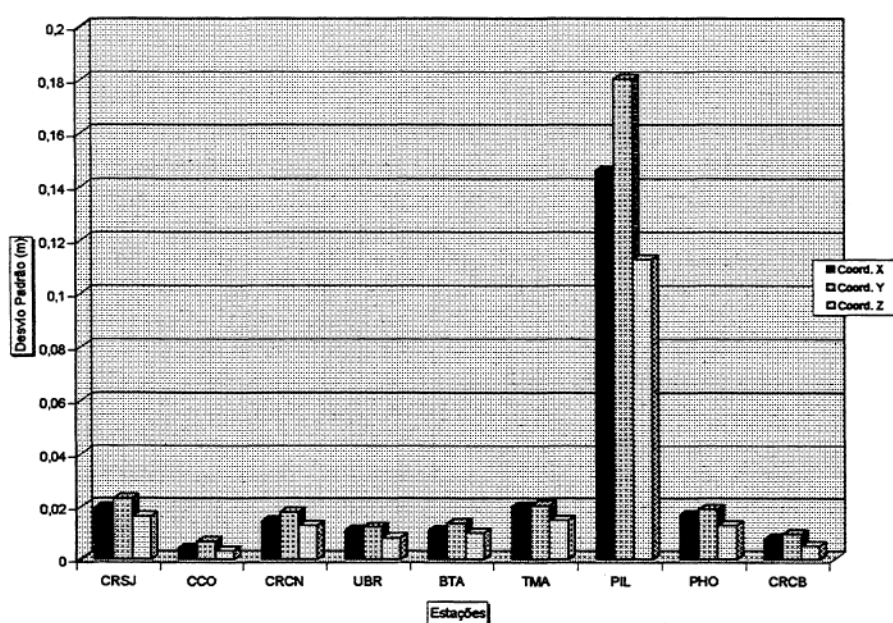


GRÁFICO 4.9 – DESVIO PADRÃO EM X, Y, Z (WGS-84) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS TENDO COMO REFERÊNCIA A ESTAÇÃO PARA, 2ª ÉPOCA



Os melhores resultados em termos de precisão, foram aqueles advindos do processamento utilizando a frequência L1, para as linhas de base formadas pelas estações base PARA e KM03. No entanto, para algumas estações relativas, tendo a KM03 como estação base, resultados satisfatórios foram alcançados pela combinação linear Wide Lane e, em algumas estações obteve-se melhores precisões do que com L1, como é o caso da estação CRSJ (1ª época), CRCN (2ª campanha), BTA (1ª e 2ª época) e PIL (2ª época). Pode-se observar pela tabela 3.4, que as estações CRSJ, CRCN e BTA, são as que formam com a KM03 as linhas de base de maior comprimento. Deste modo, é justificado, então, o fato da combinação linear Wide Lane produzir melhores resultados do que com a frequência L1

A estação localizada no terreno da subestação Pilarzinho (PIL) apresenta os maiores desvios padrão, fato este que pode ser justificável dado que a mesma se encontra próxima de uma torre de rádio – telecomunicação e outra de alta-tensão (figura 3.5), e portanto mais propícia às interferências sobre o sinal transmitido pelos satélites e recebido pela antena instalada na estação supracitada. Detalhes podem ser vistos em CUNHA (1997).

As estações PHO e BTA localizadas próximas a torres e as linhas de alta tensão (figuras 3.4 e 3.6 respectivamente), possuem desvios padrão satisfatórios, quando comparadas com estações que não estão sujeitas aos efeitos oriundos de sua localização, como por exemplo, a estação CRSJ.

4.2 AJUSTAMENTO DAS COMPONENTES (ΔX , ΔY , ΔZ) OBTIDAS NOS PROCESSAMENTOS DAS LINHAS DE BASE

No ajustamento de dados GPS pelo método dos mínimos quadrados, uma consideração de extrema importância é a correlação matemática entre observações, que pode ser tratada de três maneiras:

- 1) ignorá-las;
- 2) considerar o efeito individualmente para cada linha de base (correlação entre satélites); e
- 3) considerar o efeito conjunto para cada linha de base.

A primeira e a segunda alternativa não requerem linhas de base observadas simultaneamente e, portanto, aplicam-se a processamento por linha de base individual. No entanto, a terceira alternativa é a mais rigorosa, visto que se aplica a linhas de bases observadas simultaneamente.

O FILLNET, módulo de ajustamento do PRISM, utiliza para a correlação matemática o segundo tratamento, ou seja, considera o efeito individualmente para cada linha de base, não permitindo alterações, por se caracterizar num programa comercial e não haver interação com o usuário. Este módulo, permite o ajustamento com ou sem injunções, bem como, o ajustamento com injunções e introdução de novas observações.

No entanto, dentre as desvantagens deste módulo, cita-se:

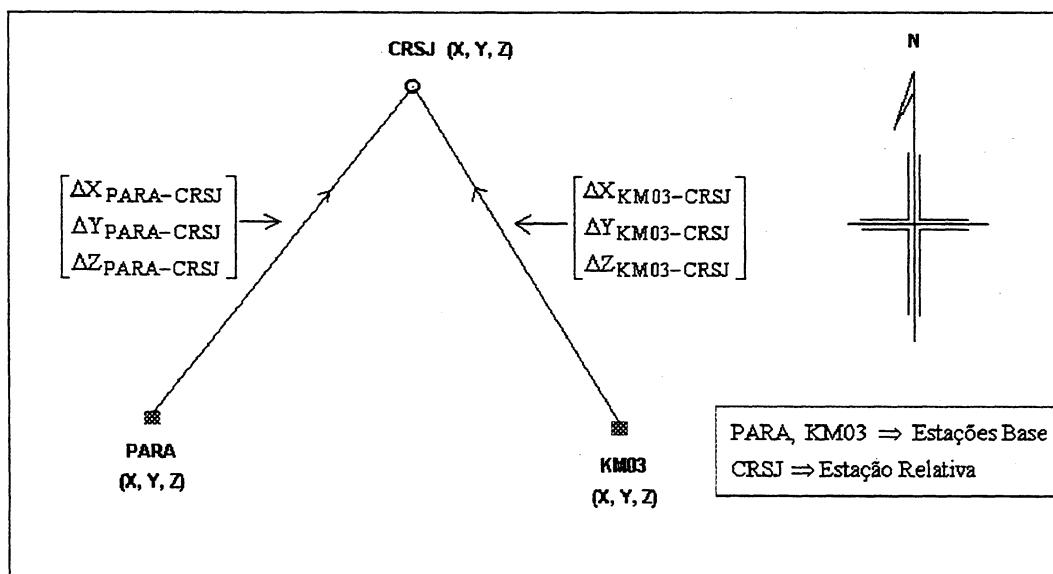
- a) considera que as observações são independentes; e
- b) considera que os pesos sejam inversamente proporcionais aos comprimentos das linhas de base e as variâncias (σ_0^2) sejam unitárias.

Estas considerações, não condizem com a realidade a ser modelada, onde que para um tratamento mais adequado para o ajustamento, melhor seria considerar a variância de cada observação, bem como, as correlações com as demais. Por este motivo, os ajustamentos não foram feitos por meio do módulo FILLNET do PRISM e, uma rotina para ajustamento foi implementada no MATLAB versão 5.3, empregando o modelo paramétrico, conforme descrito na seção 2.2.

4.2.1 Modelo Matemático

Nas duas campanhas GPS realizadas, cada estação relativa foi posicionada em função de duas estações base, ou seja, para cada estação relativa foram gerados 6 vetores de posição conforme observa-se na figura 4.1

FIGURA 4.1 – VETORES DE POSIÇÃO GERADOS EM UMA ESTAÇÃO RELATIVA EM FUNÇÃO DE DUAS ESTAÇÕES BASE



Neste trabalho, os vetores de posição $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ são considerados como observações medidas e as coordenadas das estações relativas são os parâmetros a serem determinados no ajustamento pelo método dos mínimos quadrados. Deste modo, as equações de observação podem ser consideradas lineares. O modelo na forma $L_a = F(X_a)$ é expresso por:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1^a \\ \Delta Y_1^a \\ \Delta Z_1^a \\ \Delta X_2^a \\ \Delta Y_2^a \\ \Delta Z_2^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r^a & X_{\text{PARA}} \\ Y_r^a & Y_{\text{PARA}} \\ Z_r^a & Z_{\text{PARA}} \\ X_r^a & X_{\text{KM03}} \\ Y_r^a & Y_{\text{KM03}} \\ Z_r^a & Z_{\text{KM03}} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

onde: $(\Delta X_i^a, \Delta Y_i^a, \Delta Z_i^a)$ representam o vetor das posições ajustadas e, (X_r^a, Y_r^a, Z_r^a) representam as coordenadas das estações relativas ajustadas

A matriz dos pesos, por definição é dada por GEMAEL (1994):

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1}. \quad (4.6)$$

A variância a priori foi considerada igual a $\sigma_0^2 = 1$, e a MVC das observações (Σ_{L_b}) corresponde a MVC dos vetores de posição.

Como o modelo matemático é linear, a matriz A definida para cada estação foi expressa por:

$$A = \begin{bmatrix} & 1 & 0 & 0 \\ \text{PARA} & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 0 \\ \text{KM03} & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

na qual, os elementos unitários representam as derivadas parciais das equações de observação em relação as coordenadas ajustadas.

Deste modo, foram calculados o vetor de correções aos parâmetros, as coordenadas ajustadas das estações relativas e os resíduos, por meio da rotina desenvolvida no MATLAB. Em seguida, calculou-se as observações ajustadas.

Posteriormente, calculou-se os índices de variância a posteriori e, as matrizes variância-covariância das coordenadas e observações ajustadas, bem como, dos resíduos.

Nas tabelas 4.1 e 4.2, observam-se as coordenadas das estações relativas ajustadas com seus respectivos desvios padrão, referentes as 1ª e 2ª épocas, respectivamente.

TABELA 4.1 – COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES RELATIVAS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (1ª ÉPOCA)

EST. RELAT.	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
CRSJ	3.764.077,81630	0,01065	-4.359.369,25002	0,01009	-2.733.024,79199	0,00828
CRCN	3.767.956,97381	0,01023	-4.364.952,67190	0,01005	-2.718.888,46427	0,00795
UBR	3.764.625,00913	0,02408	-4.362.599,51420	0,02408	-2.727.170,93548	0,02408
TMA	3.766.525,11140	0,00517	-4.363.685,81632	0,00577	-2.722.773,58433	0,00419
BTA	3.741.962,96915	0,06000	-4.386.026,97369	0,06000	-2.720.953,73309	0,06000
PHO	3.757.331,65833	0,01058	-4.365.026,97513	0,00985	-2.733.328,89833	0,00843
CRCB	3.757.450,83606	0,01549	-4.369.597,70163	0,01549	-2.725.899,15299	0,01549
PIL	3.762.721,06624	0,01074	-4.370.824,77116	0,01702	-2.716.851,99478	0,01645
CCO	3.753.799,72995	0,01842	-4.374.915,27459	0,01719	-2.722.542,79039	0,01143

TABELA 4.2 – COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES RELATIVAS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA)

EST. RELAT.	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
CRSJ	3.764.077,78887	0,01192	-4.359.369,24011	0,01397	-2.733.024,77743	0,00991
CRCN	3.767.957,11388	0,03075	-4.364.952,82064	0,03075	-2.718.888,55050	0,03075
UBR	3.764.625,00383	0,00803	-4.362.599,50413	0,00803	-2.727.170,93505	0,00803
TMA	3.766.525,12072	0,00855	-4.363.685,84612	0,00874	-2.722.773,61466	0,00638
BTA	3.741.963,11166	0,00952	-4.386.027,04359	0,01196	-2.720.953,81570	0,00873
PHO	3.757.331,71682	0,01264	-4.365.027,06706	0,01425	-2.733.328,97492	0,00958
CRCB	3.757.450,90542	0,01549	-4.369.597,77465	0,01549	-2.725.899,19613	0,01549
PIL	3.762.720,98122	0,01894	-4.370.824,66621	0,02304	-2.716.851,89414	0,01469
CCO	3.753.799,71417	0,00607	-4.374.915,25936	0,01007	-2.722.542,76677	0,00692

Os vetores de posição ajustados com seus respectivos desvios padrão, referentes a 1ª e a 2ª época, podem ser vistas, respectivamente, nas tabelas 4.3 e 4.4.

**TABELA 4.3 – VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS COM SEUS RESPECTIVOS
DESVIOS PADRÃO (1ª ÉPOCA)**

EST. BASE	EST. REL.	VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS			DESVIOS PADRÃO		
		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
PARA	CRSJ	326,17660	5.744,51796	-8.620,03810	0,01065	0,01009	0,00828
KM03		8.211,03900	13.500,97376	-10.104,45910	0,01065	0,01009	0,00828
PARA	CRCN	4.205,33381	161,09131	5.516,28993	0,01023	0,01005	0,00795
KM03		12.090,19621	7.917,54711	4.031,86893	0,01023	0,01005	0,00795
PARA	UBR	873,36913	2.514,25330	-2.766,18128	0,02408	0,02408	0,02408
KM03		8.758,23153	10.270,70910	-4.250,60228	0,02408	0,07614	0,02408
PARA	TMA	2.773,47124	1.427,95118	1.631,16987	0,00518	0,00577	0,00419
KM03		10.658,33364	9.184,40698	146,74887	0,00518	0,00577	0,00419
PARA	BTA	-21.788,67085	-20.913,20619	3.451,02111	0,06000	0,06000	0,06000
KM03		-13.903,80845	-13.156,75039	1.966,60011	0,06000	0,06000	0,06000
PARA	PHO	-6.419,98167	86,79237	-8.924,14413	0,01057	0,00985	0,00334
KM03		1.464,88073	7.843,24817	-10.408,56513	0,01057	0,00985	0,00334
PARA	CRCB	-6.300,80394	-4.483,93413	-1.494,39879	0,01057	0,00985	0,00843
KM03		1.584,05846	3.272,52167	-2.978,81979	0,01057	0,00985	0,00671
PARA	PIL	-1.030,57376	-5.711,00366	7.522,75942	0,01074	0,01702	0,01422
KM03		6.854,28864	2.045,45214	6.068,33842	0,01074	0,01702	0,01645
PARA	CCO	-9.951,91005	-9.801,50709	1.861,96381	0,00606	0,01007	0,00692
KM03		-2.067,04765	-2.045,05129	377,54281	0,00606	0,01007	0,00692

TABELA 4.4 – VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA)

EST. BASE	EST. REL.	VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS			DESVIOS PADRÃO		
		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
PARA	CRSJ	326,14887	5.744,52739	-8.620,02323	0,01192	0,01397	0,00991
KM03		8.211,01127	13.500,98319	-10.104,44423	0,01192	0,01397	0,00991
PARA	CRCN	4.205,47388	160,94686	5.516,20370	0,03075	0,03075	0,03075
KM03		12.090,33628	7.917,40266	4.031,78270	0,03075	0,03075	0,03075
PARA	UBR	873,36383	2.514,26337	-2.766,18085	0,02408	0,02408	0,02408
KM03		8.758,22623	10.270,71917	-4.250,601847	0,02408	0,07614	0,02408
PARA	TMA	2.773,48072	1.427,92138	1.631,13954	0,00855	0,00874	0,00638
KM03		10.658,34312	9.184,37718	146,71854	0,00855	0,00874	0,00638
PARA	BTA	-21.788,52834	-20.913,27609	3.450,93850	0,00952	0,03782	0,02759
KM03		-13.903,66594	-13.156,82029	1.966,51750	0,00952	0,01196	0,00873
PARA	PHO	-6.419,92318	86,70044	-8.924,22072	0,01057	0,00985	0,00843
KM03		1.464,93922	7.843,15624	-10.408,64172	0,01057	0,00985	0,00843
PARA	CRCB	-6.300,734585	-4.484,00715	-1.494,44193	0,01057	0,00985	0,00334
KM03		1.584,12782	3.272,44865	-2.978,86293	0,01057	0,00985	0,00334
PARA	PIL	-1.030,658879	-5.710,89871	7.522,83417	0,004325	0,02304	0,01469
KM03		6.854,20362	2.045,55709	6.068,43907	0,018940	0,02304	0,01469
PARA	CCO	-9.951,92583	-9.801,49186	1.861,98743	0,00607	0,01007	0,00692
KM03		-2.067,06343	-2.045,03606	377,56643	0,00607	0,01007	0,00692

Os resíduos estimados com seus respectivos desvios padrão, referentes a 1ª e a 2ª época, podem ser vistos, respectivamente, nas tabelas 4.5 e 4.6.

**TABELA 4.5 – RESÍDUOS ESTIMADOS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS
PADRÃO (1ª ÉPOCA)**

EST. BASE	EST. RELAT.	RESÍDUOS ESTIMADOS			DESVIOS PADRÃO		
		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
PARA	CRSJ	0,01330	0,00436	-0,00390	0,006714	0,005984	0,005018
KM03		-0,013100	-0,00391	0,00369	0,006925	0,006969	0,005587
PARA	CRCN	-0,004688	-0,00279	0,00373	0,002499	0,002461	0,001939
KM03		0,009611	0,005707	-0,00766	0,001621	0,001589	0,001260
PARA	UBR	0,008131	-0,009904	-0,00388	0,005332	0,005332	0,005332
KM03		-0,038169	0,046495	0,018218	0,007915	0,007915	0,007915
PARA	TMA	0,000941	0,000876	0,00327	0,002236	0,002307	0,001754
KM03		-0,00315	-0,003423	-0,011628	0,007497	0,008998	0,006233
PARA	BTA	0,16214608	-0,0238306	-0,093394	0,135795	0,135795	0,135795
KM03		-0,0760539	0,0120694	0,043806	0,063689	0,063689	0,063689
PARA	PHO	0,001731	0,0036739	-0,005532	0,000502	0,000718	0,000616
KM03		-0,002368	-0,005026	0,007567	0,001055	0,000983	0,000842
PARA	CRCB	0,0289633	-0,0341307	-0,029792	0,053534	0,054241	0,055495
KM03		-0,016436	0,019369	0,016907	0,037073	0,037073	0,039832
PARA	PIL	-0,024961	0,017736	0,028021	0,032005	0,050018	0,049533
KM03		0,022839	-0,016664	-0,025079	0,029269	0,046996	0,044346
PARA	CCO	-0,0590548	0,064213	0,0339074	0,119781	0,108878	0,072164
KM03		0,016542	-0,017986	-0,0094926	0,061415	0,051251	0,033636

**TABELA 4.6 – RESÍDUOS ESTIMADOS COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS
PADRÃO (2ª ÉPOCA)**

EST. BASE	EST. RELAT.	RESÍDUOS ESTIMADOS			DESVIOS PADRÃO		
		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
PARA	CRSJ	-0,0073251	0,0082854	0,0061707	0,005661	0,006625	0,004715
KM03		0,0120750	-0,0137146	-0,0101293	0,009339	0,010962	0,007741
PARA	CRCN	-0,010258	0,0183569	0,0139975	0,011561	0,011561	0,011561
KM03		0,028684	-0,0515431	-0,0393025	0,010269	0,010269	0,010269
PARA	UBR	0,002932	0,0000702	-0,0035474	0,005666	0,005666	0,005666
KM03		-0,0137672	-0,0003297	0,0166526	0,008409	0,008409	0,008409
PARA	TMA	-0,0024814	-0,0024184	-0,00096434	0,001071	0,001097	0,000801
KM03		0,010719	0,0103816	0,00409356	0,001461	0,001489	0,001086
PARA	BTA	-0,013838	-0,039488	-0,0340043	0,047959	0,059956	0,043464
KM03		0,0038616	0,011112	0,0096957	0,013379	0,016864	0,012395
PARA	PHO	-0,0070776	-0,000455	0,0050818	0,000765	0,000918	0,000567
KM03		0,0053224	0,000344	-0,0038182	0,000615	0,000764	0,000450
PARA	CRCB	0,0352152	-0,0069537	-0,034131	0,045316	0,045915	0,046976
KM03		-0,0199847	0,0039463	0,019369	0,031382	0,032269	0,033717
PARA	PIL	0,0032206	0,0024932	-0,0009355	0,002157	0,002584	0,001679
KM03		-0,1876794	-0,1501068	0,0541645	0,003975	0,004915	0,003071
PARA	CCO	0,0077705	-0,004956	-0,0001693	0,003360	0,005640	0,000388
KM03		-0,0058295	0,003644	0,012431	0,002520	0,004147	0,028473

As variâncias a posteriori de todas as estações relativas referentes as 1ª e 2ª épocas são mostradas na tabela 4.7.

TABELA 4.7 – VARIÂNCIAS A POSTERIORI DE TODAS AS ESTAÇÕES RELATIVAS ENVOLVIDAS NOS AJUSTAMENTOS DA 1ª E 2ª ÉPOCA

ESTAÇÕES RELATIVAS	VARIÂNCIA A POSTERIORI ($\hat{\sigma}_o^2$)	
	1ª ÉPOCA	2ª ÉPOCA
CRSJ	0,64	0,61
CRCN	0,35	0,63
UBR	0,48	0,51
TMA	0,79	0,26
BTA	1,55	2,66
PHO	0,27	0,15
CRCB	2,28	1,93
PIL	2,85	0,87
CCO	3,08	0,48

5 ANÁLISE DOS AJUSTAMENTOS E DA PRECISÃO DA REDE

Por meio dos resultados obtidos seção 4.2, foram realizadas algumas análises referentes aos ajustamento das componentes (ΔX , ΔY , ΔZ) obtidas no processamento das linhas de base, bem como, a análise do critério de precisão da rede, os quais serão descritos na sequência.

5.1 ANÁLISE DOS AJUSTAMENTOS DAS LINHAS DE BASE

Analisando a tabela 4.4 verifica-se que os desvios padrão das observações ajustadas referentes a 1ª época foram inferiores a $\pm 1,7$ cm, com exceção das estações UBR e BTA, que tiveram desvios padrão significativos. A princípio, poderia-se atribuir a estes altos desvios padrão, o fato destas duas estações apresentarem comprimentos de linha de base relativamente grandes, em comparação com outras estações. No entanto, as estações CRCN e CRSJ, possuem comprimentos de linha de base superior a estação UBR e, tiveram desvios padrão menores. Por outro lado, os desvios padrão da estação BTA, referentes a 2ª época, apresentaram uma melhora significativa.

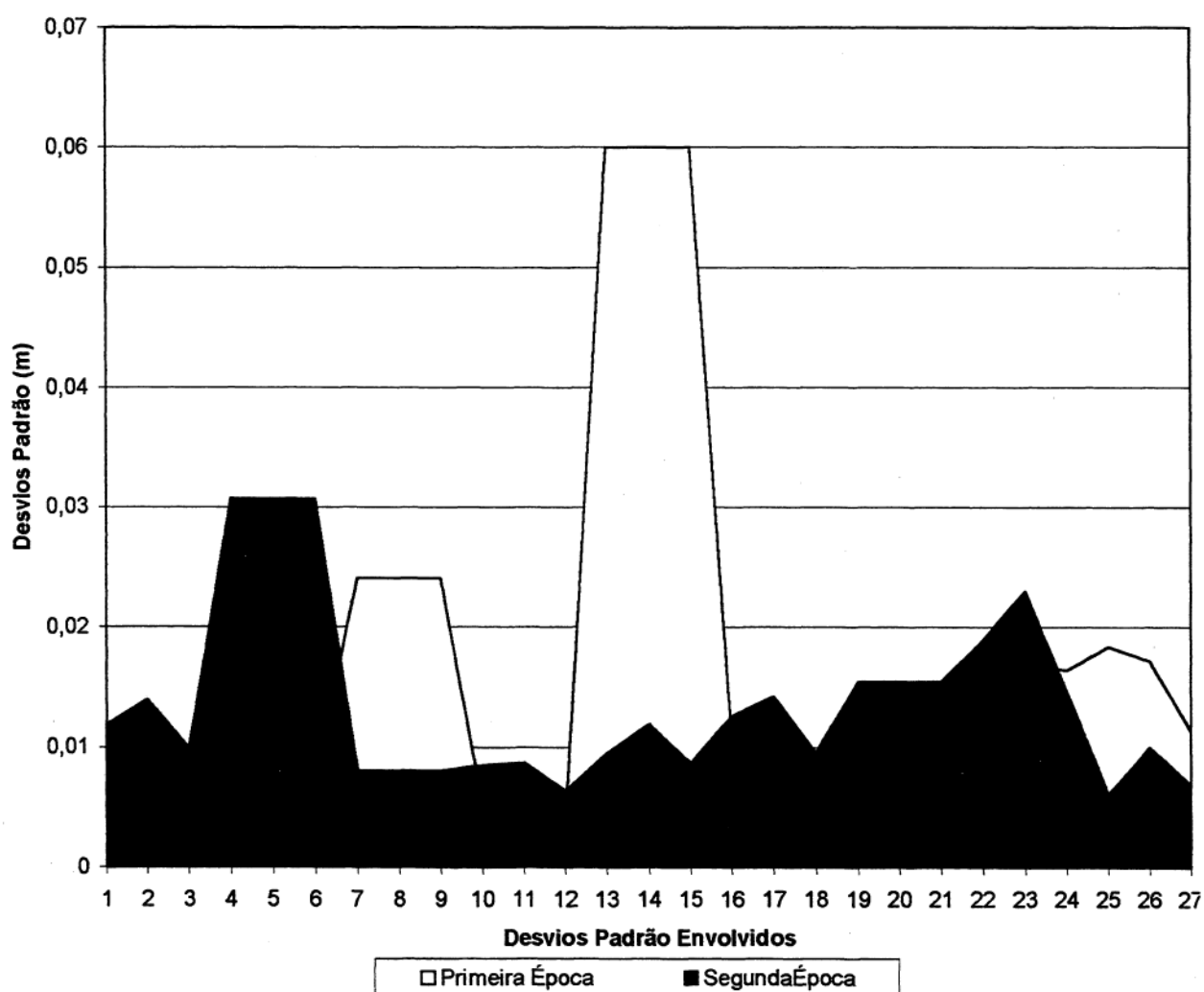
Pode-se verificar por meio da tabela 4.4 que as precisões dos vetores de posição ajustados ($\sigma_{\Delta X}$, $\sigma_{\Delta Y}$, $\sigma_{\Delta Z}$) para a estação BTA apresentaram os piores resultados. No entanto, pode-se constatar, também, que há uma homogeneidade (desvios padrão iguais) nas precisões para esta estação, apesar da má qualidade. Analisando-se, então, a tabela 4.1 percebe-se que as imprecisões obtidas nas observações ajustadas da estação BTA também influenciaram significativamente as coordenadas desta estação. Estes desvios estão indicados em verde.

Pode-se observar pelas tabelas 4.3 e 4.4 que os desvios padrão dos vetores de posição ajustados da estação CCO são satisfatórios, uma vez que a mesma está localizada próxima a torres de alta tensão, sob linhas de transmissão de 138 KV e, aproximadamente, a 3 m de uma cerca de arame farpado, conforme já mencionado na seção 4.1.3.

Pode-se observar pelas tabelas 4.2 e 4.3, que as coordenadas ajustadas das estações relativas atingiram precisões centimétricas e milimétricas. No entanto, pelo gráfico 5.1 pode-se observar que houve uma degradação na precisão para a

maioria das coordenadas obtidas na segunda época, com exceção das estações UBR (seqüências 7 a 9), BTA (seqüências 13 a 15) e CCO (seqüências 25 a 27).

GRÁFICO 5.1 – DESVIOS PADRÃO DAS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES RELATIVAS DA PRIMEIRA E SEGUNDA ÉPOCA



5.2 ANÁLISE DO CRITÉRIO DE PRECISÃO DA REDE

Por meio dos conceitos de componentes principais descritos na seção 2.4.1, calculou-se os semi-eixos das elipses de erros no plano (XY), bem como, os vetores de erros do eixo (Z) das estações relativas, referentes a primeira e a segunda época. Desta maneira, a degradação da precisão para a maioria das coordenadas obtidas

na segunda época, conforme observado no gráfico 5.1, pode também ser observada nas observações, nos resíduos estimados e nas plantas de elipses e vetores de erros das coordenadas relativas, os quais podem ser vistos nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

FIGURA 5.1 – ELIPSES DE ERROS DAS COMPONENTES (X,Y) / 1ª ÉPOCA

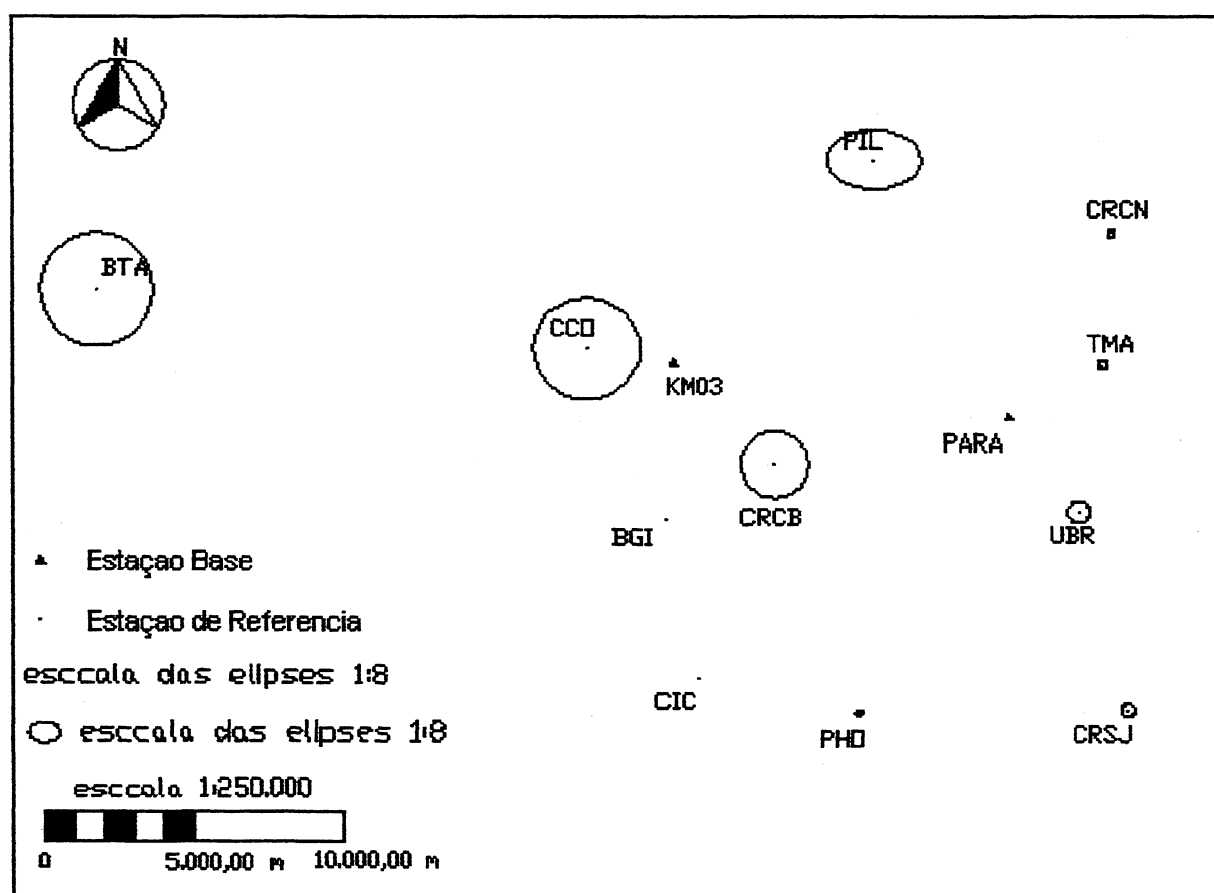


FIGURA 5.2 – ELIPSES DE ERROS DAS COMPONENTES (X,Y) / 2ª ÉPOCA

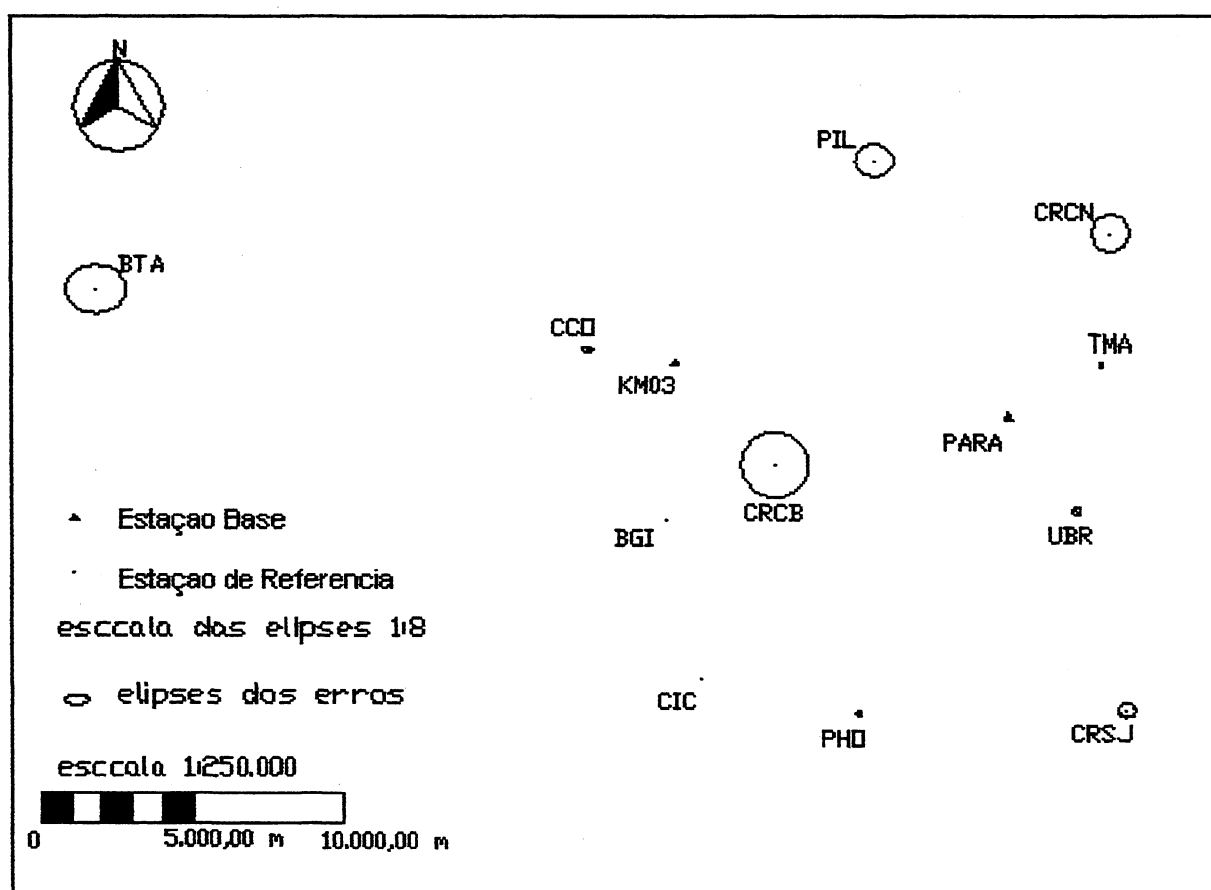
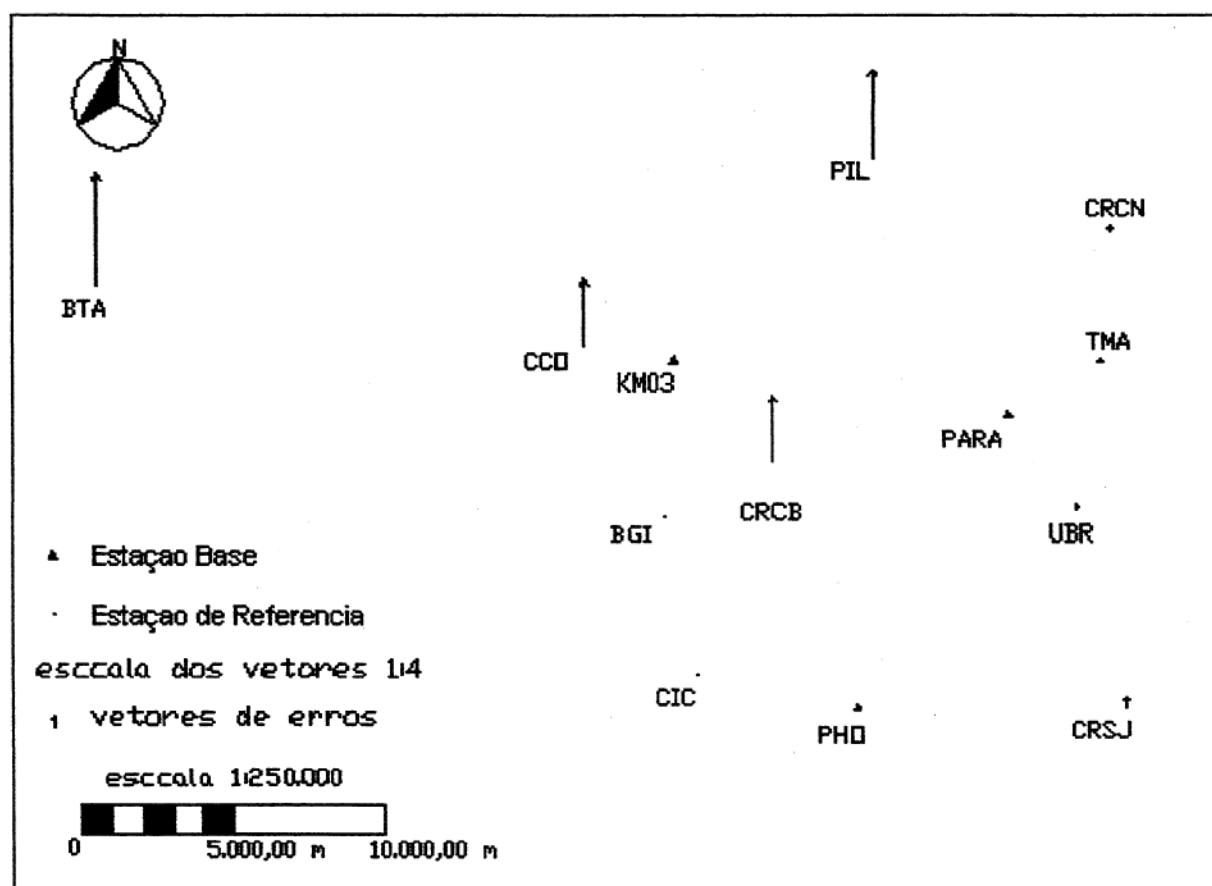


FIGURA 5.3 – VETORES DE ERROS DA COMPONENTE (Z) / 1ª ÉPOCA



6 TESTES ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE ERROS E DESLOCAMENTOS E ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL

6.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Com o objetivo de detectar possíveis erros embutidos nos vetores de posições obtidos no processamento das linhas de base da rede GPS/COPEL durante a primeira e a segunda época, foram aplicados os testes estatísticos descritos na seção 2. Esta etapa será dividida na seguintes fases:

- Teste Global, para verificar a qualidade do ajustamento, por meio da comparação entre sigma a priori e a posteriori;
- Data Snooping, para detectar possíveis erros embutidos em cada observação por meio dos resíduos padronizados; e
- Confiabilidade, para detectar erros não detectados no teste Data Snooping.

6.1.1 Análise do Teste Global

Aplicando-se a teoria do teste Global, conforme descrito na seção 2.3.1, analisou-se a qualidade dos ajustamentos, comparando o fator de variância a priori e o fator de variância a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) a um nível de confiança $(1 - \alpha)$ de 95%. Desta maneira, verificou-se o desempenho de cada ajustamento, por meio do cálculo da estatística qui-quadrado (χ^2), empregada neste teste. O resultado destes testes podem ser vistos na tabela 6.1.

**TABELA 6.1 – RESULTADOS DOS TESTES GLOBAL DAS ESTAÇÕES
RELATIVAS REFERENTES A 1ª E A 2ª ÉPOCA**

ESTAÇÕES RELATIVAS	σ_0^2	$\hat{\sigma}_0^2$	$\hat{\sigma}_0^2$	χ^{*2}	χ^{*2}	Intervalo ($\alpha = 5\%$)	
		(1ª ÉPOCA.)	(2ª ÉPOCA.)	(1ª ÉPOCA.)	(2ª ÉPOCA.)	$\chi^{*2} < 7,82$	
						(1ª ÉPOCA)	(2ª ÉPOCA)
CRSJ	1	0,64	0,61	1,92	1,84	ACEITA	ACEITA
CRCN	1	0,35	0,63	1,04	1,89	ACEITA	ACEITA
UBR	1	0,48	0,51	1,45	1,54	ACEITA	ACEITA
TMA	1	0,79	0,26	2,37	0,79	ACEITA	ACEITA
BTA	1	1,55	2,66	4,64	7,99	ACEITA	NÃO
PHO	1	0,27	0,15	0,82	0,45	ACEITA	ACEITA
CRCB	1	2,28	1,93	6,83	5,80	ACEITA	ACEITA
PIL	1	2,85	0,87	8,56	2,62	NÃO	ACEITA
CCO	1	3,08	0,48	9,25	1,45	NÃO	ACEITA

Pode-se observar pela tabela 6.1 que os ajustamentos das estações relativas referentes a primeira e a segunda época apresentaram bom desempenho, com exceção das estações PIL e CCO, primeira época e, BTA, segunda época. No entanto, nas outras estações relativas pode-se observar estações com valor de variância a posteriori superior ao da variância a priori. Provavelmente, o motivo que gerou estes altos índices de variância a posteriori seja a presença de resíduos relativamente altos em algumas observações.

Os gráficos 6.1 e 6.2 mostram os histogramas do resíduos estimados da primeira e segunda época, respectivamente.

GRÁFICO 6.1 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS ESTIMADOS NA 1ª ÉPOCA

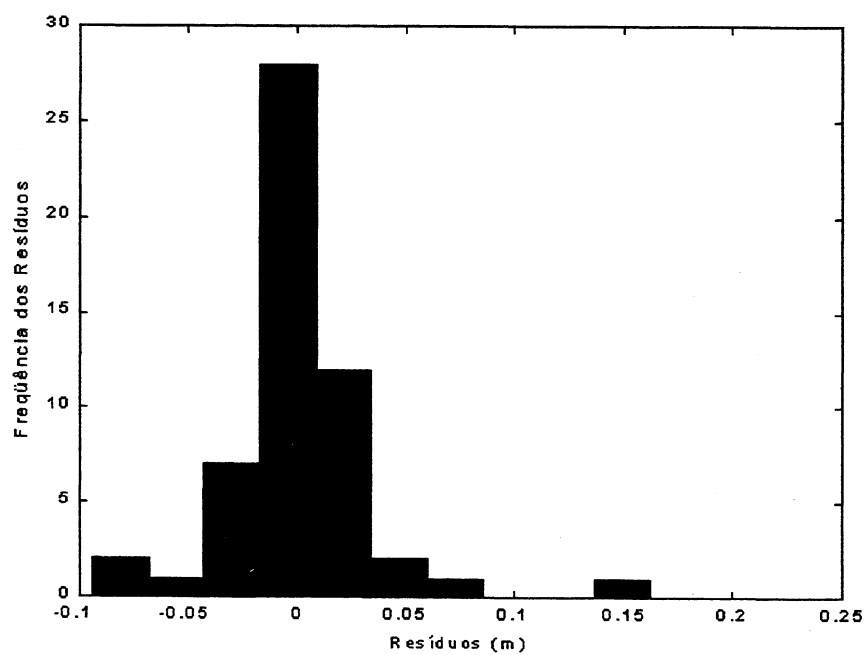
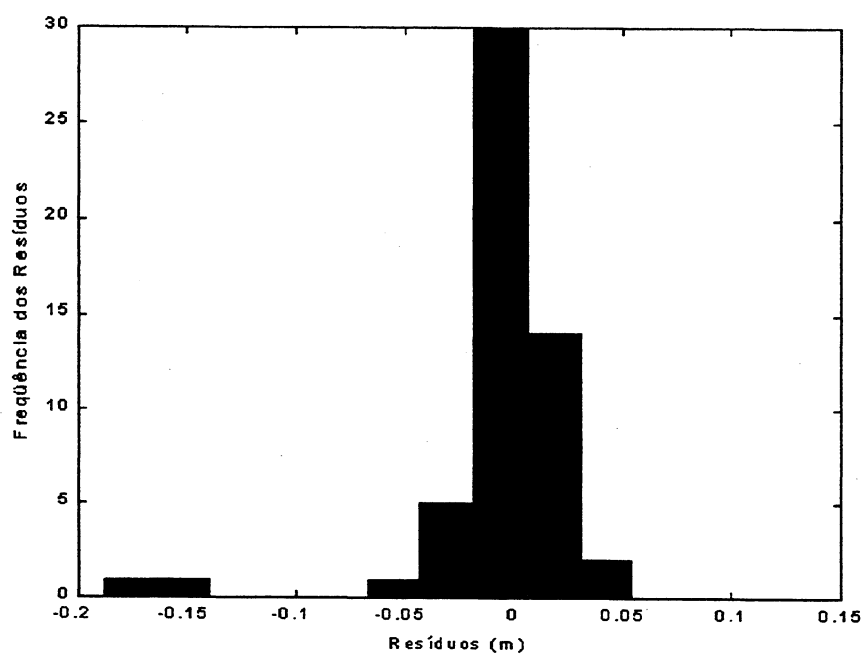


GRÁFICO 6.2 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS ESTIMADOS NA 2ª ÉPOCA



Os gráficos 6.1 e 6.2 indicam que os resíduos referentes as duas épocas tendem para uma densidade normal, o que é um bom resultado. Porém, é possível observar a existência de resíduos relativamente altos, os quais serão analisados , juntamente com as estações em que a hipótese nula não foi aceita ao nível de significância de 5% (Tabela 6.1), na seqüência pelos testes Data Snooping e Confiabilidade.

6.1.2 Análise do Teste Data Snooping

Aplicando a teoria deste teste que se encontra descrito na seção 2.3.2, e utilizando a Desigualdade de Bonferroni, calculou-se o nível de significância (α_0), para a análise dos resíduos padronizados, a partir de (CHEN et al., 1987):

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{n} \quad , \quad (6.1)$$

onde: α é o nível de significância utilizado no teste global e, n representa o número de observações.

As tabelas 6.2 e 6.3 mostram os resultados destes testes, para a primeira e a segunda época, respectivamente.

**TABELA 6.2 – RESULTADOS DO TESTE DATA SNOOPING PARA A PRIMEIRA
ÉPOCA**

EST. BASE	EST. RELAT.	PRIMEIRA ÉPOCA					
		(m) ΔX	(m) ΔY	(m) ΔZ	ACEITAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES ($\alpha=0,83\%$, $\delta_0=2,63$)		
PARA	CRSJ	1,27	0,46	0,50	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		1,21	0,37	0,42	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCN	0,66	0,39	0,67	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,66	0,40	0,67	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	UBR	0,73	0,89	0,35	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,73	0,89	0,35	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	TMA	0,33	0,30	1,47	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,33	0,30	1,47	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	BTA	1,85	0,27	1,07	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		1,85	0,27	1,06	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PHO	0,19	0,44	0,77	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,19	0,44	0,77	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCB	1,23	1,43	1,22	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		1,01	1,16	0,97	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PIL	2,22	1,01	1,61	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		2,22	1,01	1,61	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CCO	1,52	1,82	1,45	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,83	1,08	0,87	Aceita	Aceita	Aceita

TABELA 6.3 – RESULTADOS DO TESTE DATA SNOOPING PARA A SEGUNDA ÉPOCA

EST. BASE	EST. RELAT.	SEGUNDA ÉPOCA					
		(ω_i) ΔX	(ω_i) ΔY	(ω_i) ΔZ	ACEITAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES ($\alpha=0,83\%$, $\delta_0=2,63$)		
PARA	CRSJ	0,79	0,76	0,80	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,79	0,76	0,80	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCN	0,56	1,00	0,76	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,56	1,00	0,76	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	UBR	0,26	0,01	0,32	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,26	0,006	0,32	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	TMA	0,60	0,57	0,31	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,60	0,57	0,31	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	BTA	0,77	1,75	2,08	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,77	1,75	2,08	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PHO	0,44	0,02	0,42	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,41	0,02	0,40	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCB	1,50	0,29	1,40	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		1,22	0,24	1,11	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PIL	1,30	0,84	0,52	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		1,30	0,84	0,48	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CCO	1,11	0,42	0,21	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		1,11	0,42	0,21	Aceita	Aceita	Aceita

Por meio das tabelas 6.2 e 6.3 verifica-se que este teste não detectou nenhum erro significativo, ou seja, não detectou nenhum resíduo padronizado acima do valor limite, mesmo nas estações em que a hipótese nula do teste Global não foi aceita. No entanto, este teste se mostrou mais sensível em algumas estações, do que em outras. Por exemplo, o resíduo da observação $\Delta X_{(PARA-CRSJ)}$ (0,01330) (Tabela 4.6), referente a primeira época, é menor do que o da observação $\Delta X_{(PARA-CRCB)}$ (0,0289633) (Tabela 4.6), também referente a primeira época, porém, o resíduo padronizado da observação $\Delta X_{(PARA-CRSJ)}$ (1,27) (Tabela 6.2) é maior que o da observação $\Delta X_{(PARA-CRCB)}$ (1,23) (Tabela 6.2). Um outro exemplo, é o resíduo da observação $\Delta X_{(PARA-CRCN)}$ (0,010258) (Tabela 4.7) que em valor absoluto é maior que o da observação $\Delta X_{(PARA-CCO)}$ (0,0077705), no entanto, o resíduo padronizado da

observação $\Delta X_{(PARA-CCO)} (1,11)$ (Tabela 6.3) é maior que o da observação $\Delta X_{(PARA-CRCN)} (0,56)$ (Tabela 6.3), referente a segunda época. Esta variação de sensibilidade detectada com este teste foi provocado provavelmente pela diferença de peso embutido em cada uma destas observações.

6.1.3 Análise da Confiabilidade

6.1.3.1 Confiabilidade Interna

Conforme descrito na seção 2.4.2.1 o teste de confiabilidade interna quantifica a menor porção do erro existente na observação que pode ser localizado com uma dada probabilidade. Normalmente, este teste é utilizado com o objetivo de detectar possíveis erros não detectados em testes tradicionais, como por exemplo, o teste Global, Data Snooping e Tau. No trabalho proposto, os testes de confiabilidade, referentes as duas épocas, foram realizados com um nível de confiança $(1-\alpha_0)$ de 99,90% e poder de teste $(1-\beta_0)$ de 80%. Estes valores estatísticos são indicados por KUANG (1996, p. 140) para o monitoramento de redes geodésicas. Por meio destes valores estatísticos pode-se estimar o parâmetro de não-centralidade (δ_0), que no caso do presente trabalho encontra-se na tabela 2.3.

Inicialmente, calculou-se as redundâncias parciais de todas as observações, por meio da equação (2.23). Com estes valores efetuou-se o controle das observações. Os valores das redundâncias parciais, com sua respectiva decisão sobre a controlabilidade das observações, referentes a 1ª e a 2ª época, podem ser vistos nas tabelas 6.4 e 6.5, respectivamente. Os intervalos recomendados para a orientação sobre a controlabilidade de observações mediante as redundâncias parciais encontram-se na tabela 2.2.

**TABELA 6.4 – REDUNDÂNCIAS PARCIAIS E RESPECTIVA DECISÃO SOBRE A
CONTROLABILIDADE DAS OBSERVAÇÕES (1ª ÉPOCA)**

EST. BASE	EST. RELAT.	REDUNDÂNCIAS PARCIAIS			CONTROLABILIDADE		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
PARA	CRSJ	0,77	0,72	0,74	Boa	Boa	Boa
KM03		0,32	0,30	0,30	Boa	Boa	Boa
PARA	CRCN	0,94	0,94	0,94	Boa	Boa	Boa
KM03		0,19	0,19	0,19	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	UBR	0,37	0,37	0,37	Boa	Boa	Boa
KM03		0,17	0,17	0,17	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	TMA	0,29	0,26	0,28	Suficiente	Suficiente	Suficiente
KM03		0,98	1,00	0,99	Boa	Boa	Boa
PARA	BTA	0,44	0,44	0,44	Boa	Boa	Boa
KM03		0,21	0,21	0,21	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	PHO	0,16	0,16	0,16	Suficiente	Suficiente	Suficiente
KM03		0,21	0,21	0,21	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	CRCB	0,36	0,37	0,39	Boa	Boa	Boa
KM03		0,31	0,33	0,36	Boa	Boa	Boa
PARA	PIL	0,18	0,18	0,19	Suficiente	Suficiente	Suficiente
KM03		0,17	0,17	0,17	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	CCO	0,32	0,30	0,30	Boa	Boa	Boa
KM03		0,30	0,24	0,23	Boa	Suficiente	Suficiente

TABELA 6.5 – REDUNDÂNCIAS PARCIAIS E RESPECTIVA DECISÃO SOBRE A CONTROLABILIDADE DAS OBSERVAÇÕES (2ª ÉPOCA)

EST. BASE	EST. RELAT.	REDUNDÂNCIAS PARCIAIS			CONTROLABILIDADE		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
PARA	CRSJ	0,59	0,62	0,62	Boa	Boa	Boa
KM03		1,00	1,00	1,00	Boa	Boa	Boa
PARA	CRCN	0,42	0,42	0,42	Boa	Boa	Boa
KM03		0,12	0,12	0,12	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	UBR	0,34	0,34	0,34	Boa	Boa	Boa
KM03		0,16	0,16	0,16	Suficiente	Suficiente	Suficiente
PARA	TMA	0,72	0,73	0,73	Boa	Boa	Boa
KM03		0,31	0,31	0,31	Boa	Boa	Boa
PARA	BTA	0,29	0,29	0,29	Suficiente	Suficiente	Suficiente
KM03		0,08	0,08	0,08	Ruim	Ruim	Ruim
PARA	PHO	0,47	0,53	0,45	Boa	Boa	Boa
KM03		0,40	0,49	0,37	Boa	Boa	Boa
PARA	CRCB	0,43	0,44	0,46	Boa	Boa	Boa
KM03		0,37	0,39	0,43	Boa	Boa	Boa
PARA	PIL	0,03	0,05	0,02	Ruim	Ruim	Ruim
KM03		0,12	0,18	0,07	Suficiente	Suficiente	Ruim
PARA	CCO	0,53	0,53	0,01	Boa	Boa	Ruim
KM03		0,40	0,39	0,91	Boa	Boa	Boa

Por meio da análise das tabelas 6.4 e 6.5, observa-se que algumas estações tiveram valores de redundância próximos de zero, tendo os valores mais críticos as estações BTA, PIL e CCO, ambas referentes a 2ª época. Em teoria, as estações que tiveram a controlabilidade *ruim* deveriam ter, necessariamente, as observações desconsideradas para as análises seguintes. No entanto, o teste de confiabilidade interna, efetuado na seqüência, decidirá se essas redundâncias com valores próximos de zero refletirão em erros significativos.

O valores dos possíveis erros significativos (∇I_i) e seus respectivos valores mínimos (∇I_0), referentes a 1ª e a 2ª época, podem ser vistos na tabelas 6.6 e 6.7, respectivamente.

TABELA 6.6 – ANÁLISE DA CONFIABILIDADE INTERNA PARA A 1ª ÉPOCA

EST. BASE	EST. RELAT.	1ª ÉPOCA ($\alpha_0 = 0,1\%$, $\beta_0 = 20\%$, $\delta_0 = 4,13$)						ACEITAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES		
		(∇l_0) Δ_x (m)	(∇l_0) Δ_y (m)	(∇l_0) Δ_z (m)	(∇l_i) Δ_x (m)	(∇l_i) Δ_y (m)	(∇l_i) Δ_z (m)	Δ_x	Δ_y	Δ_z
PARA	CRSJ	0,050	0,049	0,040	0,017	0,006	0,005	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,049	0,045	0,038	0,017	0,005	0,005	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCN	0,044	0,043	0,034	0,005	0,028	0,004	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,097	0,095	0,121	0,052	0,030	0,040	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	UBR	0,163	0,163	0,163	0,022	0,027	0,010	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,241	0,763	0,241	0,225	0,274	0,107	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	TMA	0,040	0,047	0,033	0,003	0,003	0,012	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,022	0,024	0,017	0,003	0,003	0,011	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	BTA	0,374	0,374	0,374	0,369	0,369	0,369	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,541	0,541	0,541	0,362	0,362	0,362	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PHO	0,109	0,102	0,087	0,011	0,023	0,035	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,095	0,089	0,076	0,011	0,024	0,036	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCB	0,073	0,067	0,056	0,010	0,092	0,076	Não	Não	Não
KM03		0,078	0,071	0,046	0,053	0,059	0,047	Aceita	Aceita	Não
PARA	PIL	0,105	0,166	0,135	0,139	0,099	0,147	Não	Aceita	Não
KM03		0,108	0,170	0,165	0,134	0,098	0,148	Não	Aceita	Aceita
PARA	CCO	0,044	0,076	0,052	0,185	0,214	0,113	Não	Não	Não
KM03		0,046	0,085	0,060	0,055	0,075	0,041	Não	Aceita	Aceita

TABELA 6.7 – ANÁLISE DA CONFIABILIDADE INTERNA PARA A 2ª ÉPOCA

EST. BASE	EST. RELAT.	2ª ÉPOCA ($\alpha_0 = 0,1\%$, $\beta_0 = 20\%$, $\delta_0 = 4,13$)						ACEITAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES		
		(∇l_0) Δ_x (m)	(∇l_0) Δ_y (m)	(∇l_0) Δ_z (m)	(∇l_i) Δ_x (m)	(∇l_i) Δ_y (m)	(∇l_i) Δ_z (m)	Δ_x	Δ_y	Δ_z
PARA	CRSJ	0,064	0,073	0,052	0,012	0,013	0,001	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,049	0,058	0,041	0,012	0,013	0,010	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCN	0,196	0,196	0,196	0,024	0,044	0,033	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,367	0,367	0,367	0,0239	0,123	0,327	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	UBR	0,171	0,171	0,171	0,009	0,0002	0,010	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,249	0,249	0,249	0,086	0,002	0,104	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	TMA	0,042	0,042	0,031	0,003	0,003	0,001	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,063	0,065	0,047	0,035	0,033	0,013	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	BTA	0,073	0,290	0,212	0,048	0,136	0,117	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,139	0,175	0,127	0,048	0,138	0,121	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PHO	0,064	0,056	0,052	0,015	0,001	0,011	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,069	0,058	0,057	0,013	0,0007	0,010	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	CRCB	0,067	0,061	0,051	0,088	0,016	0,074	Não	Aceita	Não
KM03		0,073	0,067	0,053	0,054	0,010	0,045	Aceita	Aceita	Aceita
PARA	PIL	0,103	0,425	0,429	0,107	0,050	0,047	Não	Aceita	Aceita
KM03		0,226	0,224	0,229	1,564	0,834	0,774	Não	Não	Não
PARA	CCO	0,034	0,057	0,286	0,015	0,009	0,017	Aceita	Aceita	Aceita
KM03		0,040	0,067	0,030	0,015	0,009	0,014	Aceita	Aceita	Aceita

Observando-se as tabelas 6.6 e 6.7, verifica-se que o Teste de Confiabilidade apresentou resultados satisfatórios, uma vez que ele foi capaz de detectar erros não detectados no teste Data Snooping. Pode-se observar, também, que o número de observações reprovadas da 1ª época (9 observações) foi maior que o da 2ª época (5 observações). Analisando-se a tabela 6.1, verifica-se que existe uma correlação entre as estações, cujas observações foram reprovadas no Teste de Confiabilidade, e as estações que resultaram em sigma a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) maiores que o sigma a priori (σ_0^2), consequentemente, como já mencionado anteriormente, com $V^T PV$ elevado, apesar de que todas as estações, nas duas campanhas, foram aprovadas no Teste Global. No entanto, há exceções, como por exemplo, a estação BTA resultou em sigma a posteriori maior do que a priori, na 1ª e

na 2ª época (1,55 e 2,66, respectivamente) e, contudo, foi aprovada no Teste de Confiabilidade. Tem-se, também, a estação PIL, 2ª época, que resultou em sigma a posteriori menor que do que a priori (0,87), porém, foi reprovada no Teste de Confiabilidade. Os erros significativos detectados pelo Teste de Confiabilidade e as diferenças mencionadas acima, podem ser atribuídas aos resíduos elevados presentes nas observações envolvidas, conforme pode-se observar por meio das tabelas 4.6 e 4.7.

Para a tarefa de detecção de erros, as redundâncias parciais tiveram importante participação, como por exemplo nas observações ΔX , ΔY e ΔZ , referentes a linha de base KM03 – BTA (2ª época) as quais tiveram controlabilidade ‘Ruim’ (tabela 6.5), no entanto, não refletiram a erros significativos devido aos valores relativamente baixos encontrados em seus resíduos correspondentes (tabela 4.7). De outra maneira, têm-se como exemplo, as observações ΔX e ΔZ , da linha de base PARA – CRCB (2ª época), as quais tiveram controlabilidade ‘Boa’ (tabela 6.5), contudo, encontrou-se erros significativos em suas correspondentes observações, devido ao fato de possuírem resíduos relativamente altos (tabela 4.7).

6.1.3.2 Confiabilidade Externa

Foram calculadas as medidas de confiabilidade externa das estações, cujas observações foram reprovadas no teste de confiabilidade interna, com o objetivo de verificar a influência dos erros detectados nas coordenadas. Estas influências podem ser vistas na tabela 6.8.

TABELA 6.8 – MEDIDA DE CONFIABILIDADE EXTERNA

EST. RELAT.	1ª ÉPOCA			2ª ÉPOCA		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CCO	0,04556	0,08303	0,05825			
PIL	0,10657	0,16806	0,16075	0,33787	0,32350	0,32800
CRCB	0,07619	0,06955	0,05664	0,07083	0,06483	0,05228

Por meio da tabela 6.8 pode-se observar as propagações dos erros significativos nas coordenadas. Os erros que causaram os desvios padrão relativamente altos encontrados nas observações das estações CCO (1ª época), PIL e CRCB foram somente detectados neste teste. Os espaços vazios em X, Y e Z da estação CCO, 2ª época, é devido ao fato de suas componentes terem obtido aprovação no teste de confiabilidade interna.

Na sequência, serão analisadas somente as estações reprovadas no teste de confiabilidade.

6.1.3.3 Análise das Estações Rejeitadas no Teste de Confiabilidade

As estações rejeitadas no teste de confiabilidade, não são necessariamente rejeitadas. Elas podem ser ainda aproveitadas, desde que sejam reajustadas (utilizando apenas as observações aprovadas na análise de confiabilidade) e, também, obtenham aprovação nos testes estatísticos. No entanto, a condição para a realização do primeiro procedimento, ou seja, o reajustamento, é necessário a existência de graus de liberdade (W) (GEMAEL, 1994). Verifica-se por meio das tabelas 6.6 e 6.7, que das estações reprovadas no teste de confiabilidade, somente a estação CRCB (2ª época) possui graus de liberdade para a realização de reajustamento. Utilizando os conceitos descritos na seção 2.2, realizou-se o reajustamento desta estação. Na tabela 6.8.1 e 6.9, observam-se, respectivamente, as coordenadas e os vetores de posição ajustados da estação CRCB (2ª época) com seus respectivos desvios padrão.

TABELA 6.8.1 – COORDENADAS AJUSTADAS DA ESTAÇÃO CRCB COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA)

EST.	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
CRCB	3.757.450,92540	0,031995	-4.369.597,77465	0,025556	-2.725.899,21550	0,03134

TABELA 6.9 – VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS DA ESTAÇÃO CRCB COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO (2ª ÉPOCA)

EST. BASE	EST. REL.	VETORES DE POSIÇÃO AJUSTADOS			DESVIOS PADRÃO		
		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
PARA	CRCB	—————	-4.484,007154	—————	—————	0,025556	—————
KM03		1.584,14780	3.272,448600	-2.978,8823	0,031996	0,025556	0,031343

Na tabela 6.9, os espaços em branco representam as observações rejeitadas no teste de confiabilidade. O índice de variância a posteriori, juntamente com o teste global da estação CRCB (2ª Época), estão indicados na tabela 6.10.

TABELA 6.10 – RESULTADO DO TESTE GLOBAL DA ESTAÇÃO CRCB REFERENTE A 2ª ÉPOCA

ESTAÇÕES RELATIVAS	σ_0^2	$\hat{\sigma}_0^2$ (2ª ÉPOCA.)	χ^{*2} (2ª ÉPOCA.)	Intervalo ($\alpha = 5\%$) $W = 1 ; \chi^{*2} < 3,84$
				(2ª ÉPOCA)
CRCB	1	2,72	2,72	ACEITA

Pode-se observar que o ajustamento da estação CRCB referente a 2ª época apresentou bom desempenho. No entanto, com o objetivo de verificar a possível existência de erros grosseiros nas observações, realizou-se o teste Data Snooping, o qual pode ser visto na tabela 6.11.

TABELA 6.11 – RESULTADO DO TESTE DATA SNOOPING PARA A SEGUNDA ÉPOCA

EST. BASE	EST. RELAT.	SEGUNDA ÉPOCA					
		(σ_i) ΔX	(σ_i) ΔY	(σ_i) ΔZ	ACEITAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES ($\alpha=0,83\%$, $\delta_0=2,63$)		
PARA	CRCB	—————	0,55	—————	—————	Aceita	—————
KM03		0	0,56	0	Aceita	Aceita	Aceita

Como pode ser visto na tabela 6.11, todas as observações utilizadas para o reajustamento da estação CRCB foram aprovadas no teste Data Snooping. No

entanto, com objetivo de quantificar a menor porção do erro existente nas observações realizou-se o teste de Confiabilidade, o qual poder ser visto na tabela 6.12.

TABELA 6.12 – ANÁLISE DA CONFIABILIDADE INTERNA PARA A 2ª ÉPOCA

EST. BASE	EST. RELAT.	2ª ÉPOCA ($\alpha_0 = 0,1\%$, $\beta_0 = 20\%$, $\delta_0 = 4,13$)						ACEITAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES		
		(∇l_0) Δ_x (m)	(∇l_0) Δ_y (m)	(∇l_0) Δ_z (m)	(∇l_i) Δ_x (m)	(∇l_i) Δ_y (m)	(∇l_i) Δ_z (m)	Δ_x	Δ_y	Δ_z
PARA	CRCB	—	0,132	—	—	0,011	—	—	Aceita	—
KM03		0,061	0,045	0,038	0,173	0,058	0,068	Não	Não	Não

Como pode ser observado na tabela 6.12, o teste de confiabilidade detectou erros, os quais não foram detectados no teste Data Snooping. Desta maneira, com a não aceitação de 3 observações desta estação, que se tornam em número de 5 observações (somando com as 2 observações não aceitas no 1º teste), esta estação não será utilizada para as análises de deslocamentos.

6.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DESLOCAMENTOS

Como descrito na seção 2.4.3.1, a metodologia utilizada na estimativa dos deslocamentos baseia-se no método dos mínimos quadrados. A tabela 6.13 mostra os deslocamentos estimados nas direções das componentes (X, Y, Z) e seus respectivos desvios padrão, das 6 estações aprovadas nos testes anteriores. No entanto, é importante mencionar, que o propósito da presente dissertação é a análise de deslocamento vertical, por meio da altitude elipsoidal (h). Sabe-se porém, que as coordenadas geodésicas (ϕ , λ , h) são transformadas a partir das coordenadas cartesianas elipsóidicas (X, Y, Z) (MORAES, 2001, p. 150 – 162). Desta maneira, um erro embutido em qualquer uma dessas componentes, afetará diretamente a altitude elipsoidal (h). Por isso, analisar-se-á os deslocamentos verticais, apenas das estações que obtiverem aprovação nos testes presentes nesta seção.

TABELA 6.13 – DESLOCAMENTOS ESTIMADOS

EST. RELAT.	1ª / 2ª ÉPOCA					
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)
CRSJ	- 0,02773	0,00943	0,01487	0,01271	0,01367	0,01025
CRCN	0,14007	- 0,14445	- 0,08623	0,02269	0,02267	0,02225
UBR	- 0,00530	0,01007	0,00043	0,01786	0,01786	0,01786
TMA	0,00948	- 0,02979	- 0,03033	0,00725	0,00759	0,00553
BTA	0,14251	- 0,06990	- 0,08261	0,08821	0,08886	0,08802
PHO	0,05849	- 0,09193	- 0,07659	0,00763	0,00801	0,00591

Os deslocamentos foram testados estatisticamente por meio do teste utilizado no processo de estimativa dos deslocamentos e, por meio da análise de sensibilidade.

O objetivo de se utilizar estes testes estatísticos é o de verificar a significância dos deslocamentos. Para atingir tais objetivos, foram calculadas as variâncias a posteriori única de cada estação, por meio da equação (2.34). Estes valores estão indicados na tabela 6.14.

TABELA 6.14 – VARIÂNCIA A POSTERIORI ÚNICA ENTRE AS DUAS ÉPOCAS

ESTAÇÕES RELATIVAS	$\overline{\sigma}_0^2$
CRSJ	0,625
CRCN	0,490
UBR	0,495
TMA	0,525
BTA	2,105
PHO	0,210

O teste estatístico utilizado no processo de estimativa dos deslocamentos é aplicado à cada uma das componentes (X, Y, Z), ou seja, o deslocamento referente a cada componente é testado isoladamente, enquanto, que no teste de sensibilidade

os deslocamentos em cada estação são testados globalmente. No entanto, apesar destes dois testes estatísticos serem diferentes, eles se baseiam na mesma distribuição de probabilidade. Os resultados destes dois testes podem ser vistos nas tabelas 6.15 e 6.16, respectivamente.

TABELA – 6.15 ESTATÍSTICA APLICADA NO PROCESSO DE ESTIMATIVA DOS DESLOCAMENTOS

ESTAÇÕES RELATIVAS	Hipótese Nula F_0			F ($\alpha=5\%$) ($W_1 + W_2= 6$) $m_i=1$ Condição: $F_0 < F(1, 6, 5)= 6,0$		
	X	Y	Z	X	Y	Z
CRSJ	4,76	0,48	2,11	Aceita	Aceita	Aceita
CRCN	38,08	40,61	15,02	Não	Não	Não
UBR	0,09	0,32	0,06	Aceita	Aceita	Aceita
TMA	1,71	15,41	30,09	Aceita	Não	Não
BTA	2,61	0,62	0,88	Aceita	Aceita	Aceita
PHO	58,71	131,60	167,77	Não	Não	Não

TABELA 6.16 – ESTATÍSTICA APLICADA NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

EST. RELAT.	HIP. NULA	HIP. ALTERN.	HIP. NULA ($\alpha_0= 5\%$, $W_1= 3$, $W_2= 3$) Condição: $F_0 > (3; 3; 5)= 9,3$	HIP. ALTERN. ($\alpha_0= 5\%$, $\beta_0= 20\%$) Condição: $F_A > \lambda_0= 7,84$
CRSJ	1,77	5,31	Não	Não Detectável
CRCN	32,17	96,52	Aceita	Detectável
UBR	0,14	0,41	Não	Não Detectável
TMA	16,88	50,64	Aceita	Detectável
BTA	1,37	4,12	Não	Não Detectável
PHO	121,90	365,69	Aceita	Detectável

Por meio da análise da tabela 6.15, pode-se observar que as estatísticas referentes as componentes (X, Y, Z) da estação CRSJ, obedeceram a condição imposta pela hipótese nula, ou seja, os deslocamentos analisados nesta estação não foram significativos, visto que nesta estação não se impôs deslocamento vertical. Observa-se, mesmo assim, por meio da tabela 6.13, a existência de diferença de coordenadas na direção das três componentes (X, Y, Z), nesta estação. No entanto, a estatística global (tabela 6.16) confirma a estatística utilizada no processo de estimativa de deslocamentos (tabela 6.15), de que mesmo que tenha ocorrido diferenças de coordenadas entre as duas épocas, as mesmas não são significativas. Fato adverso ocorreu nas estações UBR e BTA, nas quais se impôs deslocamentos verticais, no entanto, nenhum deslocamento significativo foi comprovado nas duas estatísticas realizadas nestas duas estações. Isto se deve, provavelmente, as baixas precisões dos deslocamentos estimados para estas estações. Observa-se pela tabela 6.13 que os desvios padrão dos deslocamentos estimados nestas duas estações, foram maiores que os próprios deslocamentos estimados, com exceção apenas do deslocamento na direção da componente (X) da estação BTA, mesmo assim, ele se constitui de grande magnitude em relação ao deslocamento estimado. Estes valores estão representados de verde nesta tabela. Deste modo, estas duas estações não serão utilizadas para as análises posteriores.

Na estação TMA, a estatística do processo de estimativa de deslocamentos não comprovou a significância do deslocamento na direção da componente (X), no entanto, os deslocamentos ocorridos nas direções (Y, Z) foram significativos, muito embora, a estatística global comprove que o deslocamento ocorrido nesta estação tenha sido significativo. Deste modo, decidiu-se utilizar esta estação para as análises posteriores.

Observa-se pelas tabelas 6.13, 6.15 e 6.16 que os valores dos testes estatísticos das estações CRCN e PHO, cujos deslocamentos analisados foram considerados significativos por meio dos dois testes realizados, variaram de acordo com a magnitude e precisão dos deslocamentos. Por exemplo, os deslocamentos estimados na estação CRCN foram maiores do que os da estação PHO (tabela 6.13). No entanto, as estatísticas que indicaram os deslocamentos na estação CRCN foram menores que os da estação PHO (tabela 6.15). Provavelmente esta variação encontrada nas estatísticas das duas estações, foi gerada pela diferença

de precisão dos deslocamentos estimados entre as duas estações envolvidas. Fato este, que ocorreu também no segundo teste (tabela 6.16).

Após a realização dos testes estatísticos dos deslocamentos, calculou-se as respectivas sensibilidades, que fornecem estatisticamente os valores mínimos de cada deslocamento estimado. Na presente dissertação, as sensibilidades foram representadas em forma de elipses de erros no plano (X,Y) e em forma de vetores de erros no eixo (Z). Para a representação das elipses de erros e dos vetores de erros foram utilizados a 1ª componente principal. A tabela 6.17 mostra as sensibilidades nas direções das componentes principais.

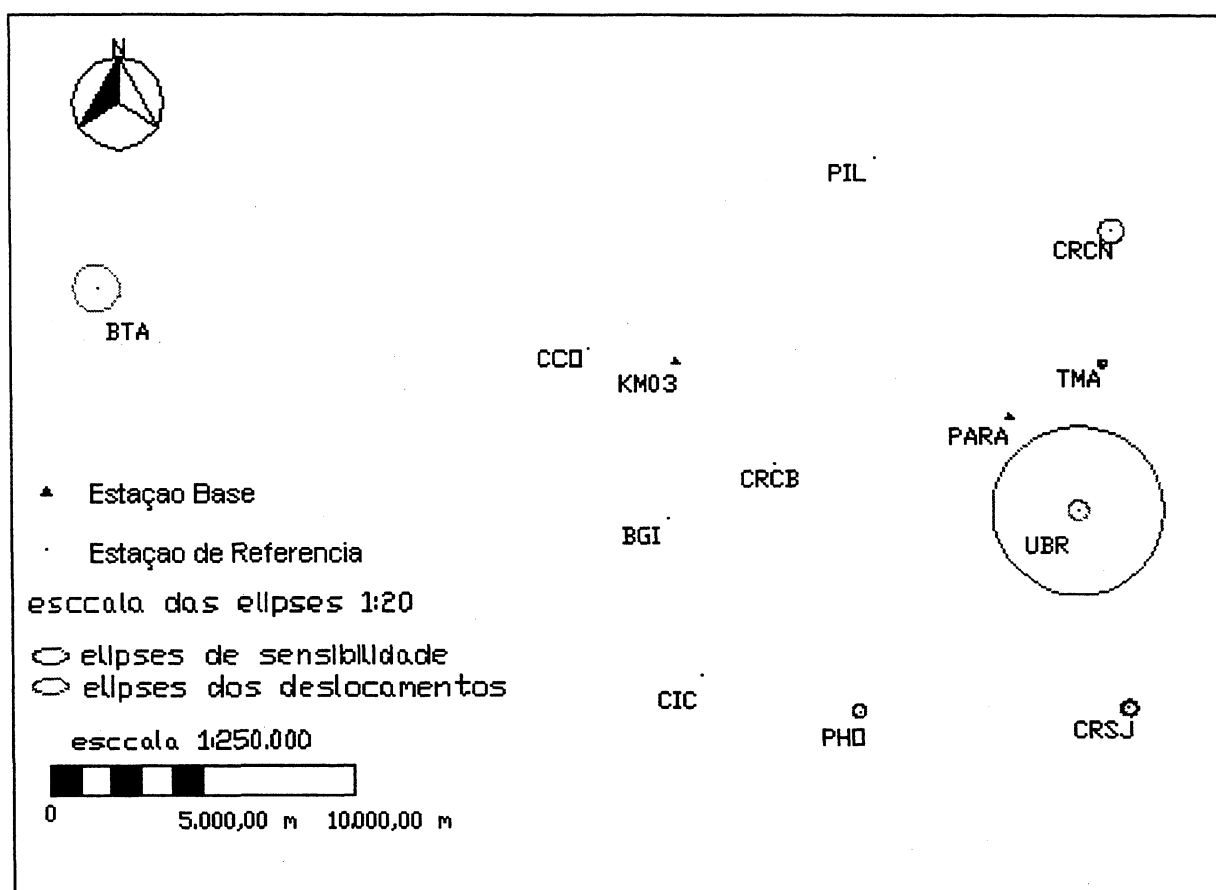
TABELA 6.17 – DESLOCAMENTOS MÍNIMOS DETECTÁVEIS

ESTAÇÕES RELATIVAS	SENSIBILIDADE NO PLANO (X,Y) (m) ($\alpha_0= 5\%$; $\beta_0= 20\%$) $\lambda_0= 7,84$		SENSIBILIDADE NO EIXO (Z) (m) ($\alpha_0= 5\%$; $\beta_0= 20\%$) $\lambda_0= 7,84$	
	1ª COMP.	2ª COMP.	1ª COMP.	2ª COMP.
CRSJ	0,06850	0,06340	0,04850	0,04480
CRCN	0,08980	0,08810	0,06350	0,06230
TMA	0,03010	0,02870	0,02130	0,02030
PHO	0,03140	0,02980	0,02220	0,02110

Correlacionando as tabelas 6.13 e 6.17, verifica-se que os deslocamentos estimados na estação CRSJ foram menores que os deslocamentos mínimos detectáveis nesta estação. Isto justifica, então, o fato das estatísticas (tabela 6.15 e 6.16) não comprovarem a existência de deslocamentos significativos nesta estação. No entanto, nas estações CRCN, TMA e PHO, verifica-se exatamente o contrário, ou seja, os deslocamentos estimados nestas estações foram maiores que os deslocamentos mínimos detectáveis. Observa-se, também, que a magnitude das sensibilidades variam de acordo com os desvios padrão dos deslocamentos estimados, ou seja, quanto menor o desvio padrão do deslocamento estimado, menor é o valor do deslocamento mínimo detectável. Isto pode ser verificado tanto para a 1ª como para a 2ª componente. Isto indica que quanto mais preciso for o deslocamento estimado da estação envolvida, menor será a medida de sensibilidade

e, conseqüentemente, maior é a capacidade da estação em detectar deslocamentos. Experimentos realizados por XAVIER (2000, p. 82-99) e EVEN-TZUR (1999, p. 313-323) proporcionaram análises semelhantes. Estas análises, também, podem ser verificadas por meio das elipses de sensibilidades e de erros dos deslocamentos estimados, conforme ilustrado na figuras 6.1.

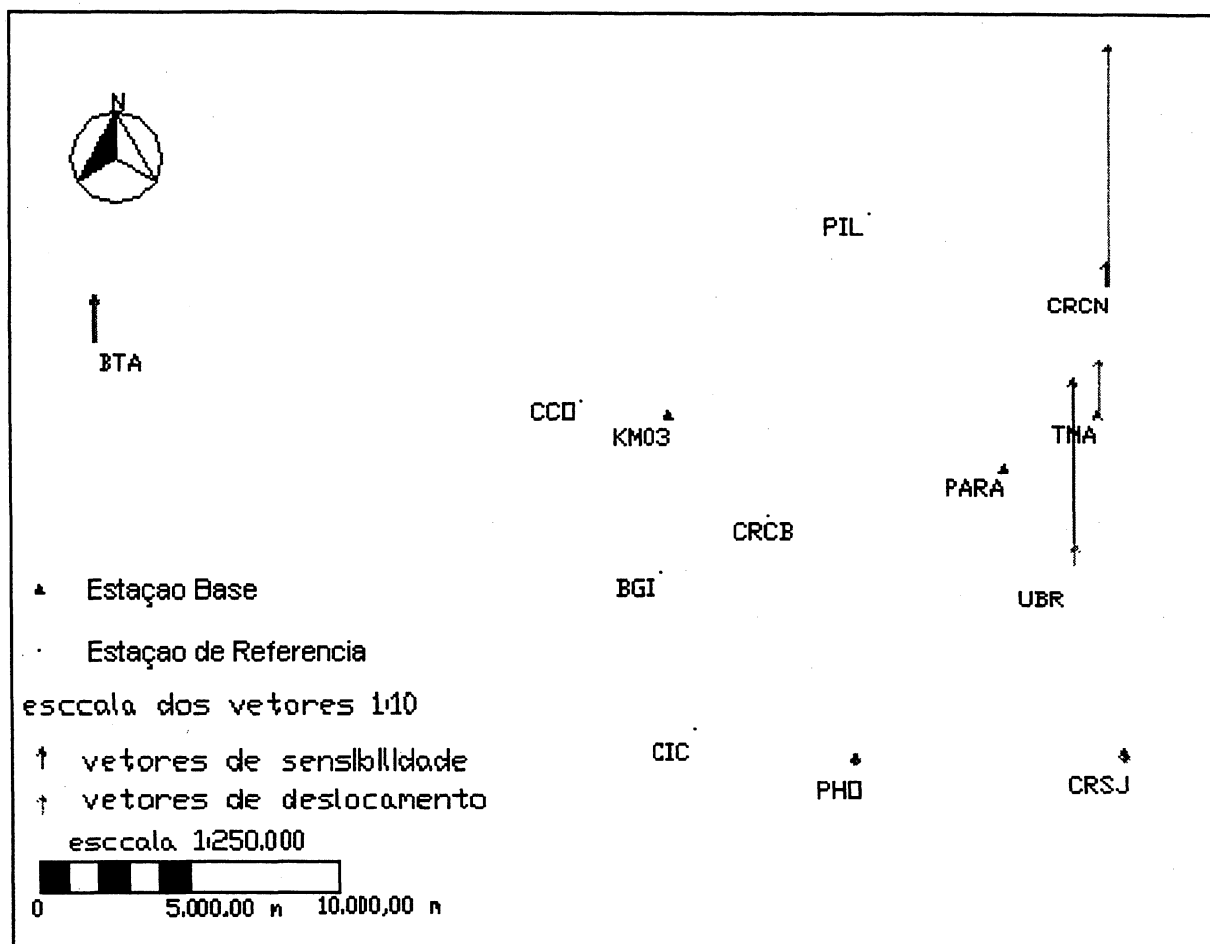
FIGURA 6.1 – ELIPSES DE SENSIBILIDADE E DE ERROS DOS DESLOCAMENTOS EM (X,Y) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS



Analisando-se a figura 6.1, verifica-se que as dimensões da elipse de sensibilidade da estação UBR são bem maiores que da elipse dos deslocamentos, enquanto que na estação BTA são praticamente iguais, embora, sejam de magnitudes consideráveis quando comparadas com as outras estações relativas. Isto justifica o fato destas duas estações obtiverem reprovação nos testes estatísticos dos deslocamentos. Fato semelhante pode ser verificado por meio dos

vetores de sensibilidade e deslocamento em (Z) das estações relativas, na figura 6.2.

FIGURA 6.2 – VETORES DE SENSIBILIDADE E DE DESLOCAMENTO EM (Z) DAS ESTAÇÕES RELATIVAS



6.3 ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL

Nesta seção, analisar-se-á o desempenho do GPS na detecção de deslocamentos verticais das estações que obtiveram aprovação nos testes estatísticos anteriores. As estações relativas CIC e BGI, nas quais o posicionamento foi realizado somente em função da estação base PARA, terão os deslocamentos verticais analisados separadamente.

6.3.1 Análise de Deslocamento Vertical das Estações Aprovadas nos Testes Estatísticos

As estações relativas CRSJ, CRCN, TMA e PHO, as quais obtiveram aprovação nos testes estatísticos anteriores, serão utilizadas nesta etapa, para as análises de deslocamento vertical, o qual foi imposto em cada uma destas estações, com exceção da estação CRSJ, na qual optou-se pela não imposição de deslocamento vertical para verificar a repetibilidade de medida do GPS, a partir de duas épocas de posicionamento, como já mencionado na seção 3. Os deslocamentos verticais impostos nas estações relativas, podem ser vistos na figura 3.9.

As coordenadas cartesianas elipsóidicas das estações relativas, uma vez ajustadas (seção 4.2), foram transformadas em coordenadas geodésicas, as quais podem ser vistas nas tabelas 6.18 e 6.19, respectivamente, juntamente com seus desvios padrão.

**TABELA 6.18 – COORDENADAS GEOGRÁFICAS ELIPSÓIDICAS AJUSTADAS
1ª ÉPOCA**

EST.	ϕ (S)	σ (")	λ (W)	σ (")	h (m)	σ (m)
CRSJ	25°32'04,78603"	0,0002	49°11'28,248205"	0,0002	902,07940	0,0095
CRCN	25°23'35,63203"	0,0002	49°11'53,74772"	0,0002	928,72427	0,0094
TMA	25°25'56,07238"	0,0001	49°12'02,91038"	0,0001	884,67789	0,0054
PHO	25°32'15,38027"	0,0003	49°16'43,53764"	0,0002	925,04452	0,0097

**TABELA 6.19 – COORDENADAS GEOGRÁFICAS ELIPSÓIDICAS AJUSTADAS
2ª ÉPOCA**

EST.	ϕ (S)	σ (")	λ (W)	σ (")	h (m)	σ (m)
CRSJ	25°32'04,78596"	0,0003	49°11'28,24872"	0,0003	902,05018	0,0098
CRCN	25°23'35,63172"	0,0008	49°11'53,74740"	0,0007	928,94563	0,0143
TMA	25°25'56,07287"	0,0002	49°12'02,91082"	0,0002	884,71688	0,0079
PHO	25°32'15,38101"	0,0003	49°16'43,53820"	0,0003	925,17484	0,0125

Verifica-se pela comparação das tabelas 6.18 e 6.19, que apesar da imposição, somente, de deslocamento vertical nas estações relativas, que as

coordenadas horizontais (ϕ , λ) também se alteraram, devido ao fato de que houve alteração nas coordenadas cartesianas (X, Y, Z) obtidas nas duas campanhas. No entanto, analisar-se-á apenas os deslocamentos verticais. Por meio da interpolação de ondulações geoidais do mapa geoidal (MAPGEO) do IBGE (versão 1992), as altitudes elipsoidais (h) foram transformadas em altitudes ortométricas (H) e, em seguida, tomou-se a diferença entre estas, de cada estação, obtidas nas duas épocas, como o deslocamento vertical ocorrido, conforme mostra a tabela 6.20.

TABELA 6.20 – ALTITUDES ORTOMÉTRICAS E DESLOCAMENTO VERTICAL DAS ESTAÇÕES RELATIVAS OBTIDAS PELO GPS

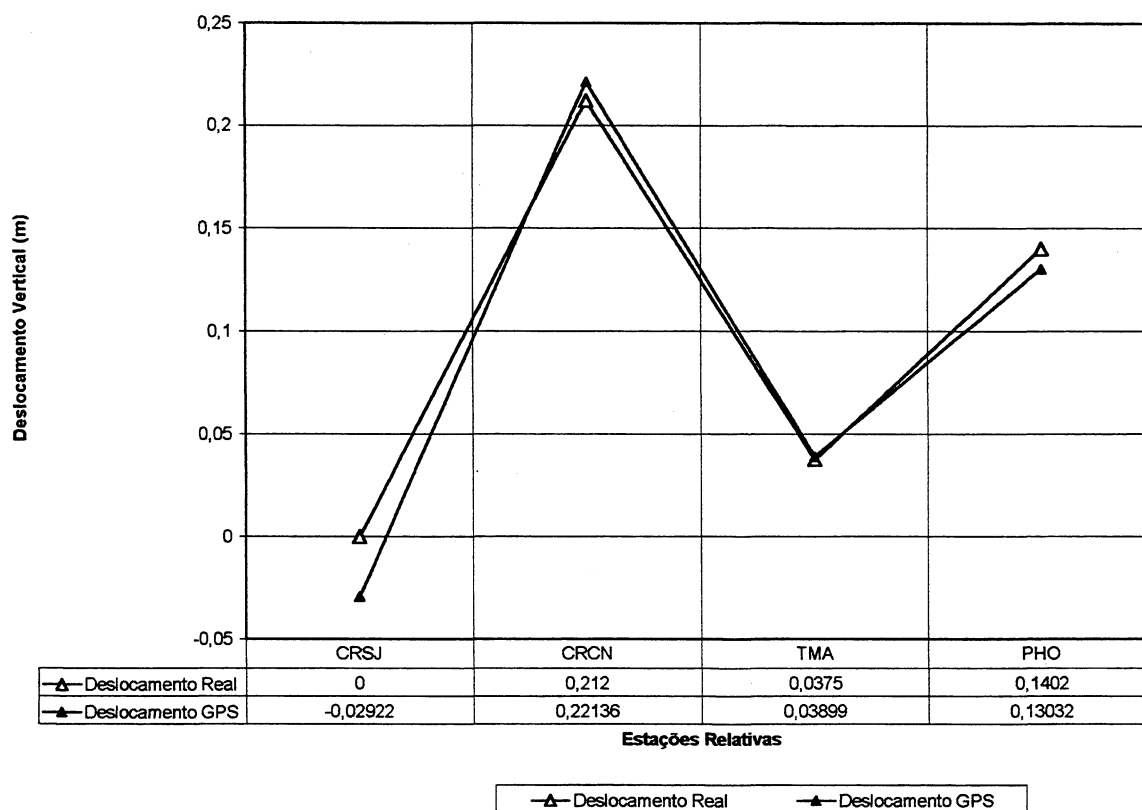
ESTAÇÃO RELATIVA	H (m) / 1ª ÉPOCA	H (m) / 2ª ÉPOCA	DESLOC. VERTICAL (m)
CRSJ	899,84940	899,82018	- 0,02922
CRCN	926,37427	926,59563	0,22136
TMA	882,35789	882,39688	0,03899
PHO	922,67452	922,80484	0,013032

Para analisar o desempenho do GPS na detecção de deslocamento vertical, confrontou-se os deslocamentos verticais impostos, cuja metodologia se encontra descrita na seção 3, aqui considerados como reais, com os obtidos por meio do GPS. Estes resultados se encontram descritos na tabela 6.21. Os deslocamentos reais e os obtidos via GPS estão representados graficamente na figura 6.3.

TABELA 6.21 – DISCREPÂNCIAS APRESENTADAS PELO GPS

ESTAÇÃO RELATIVA	DESLOC. REAL (m)	DESLOC. GPS (m)	DISCREPÂNCIAS (m)
CRSJ	0,00000	- 0,02922	- 0,02922
CRCN	0,21200	0,22136	0,00936
TMA	0,03750	0,03899	0,00149
PHO	0,1402	0,13032	- 0,00988

FIGURA 6.3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DESLOCAMENTOS REAL E GPS

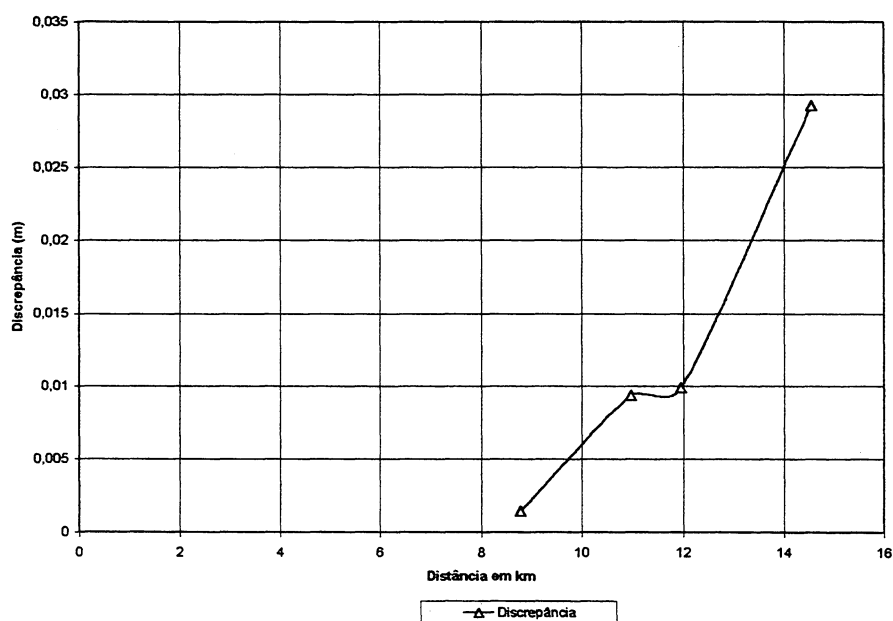


Verifica-se pela tabela 6.21 uma discrepância média de -0,00942 m, tendo uma máxima de 0,00936 m e uma mínima de -0,02922 m. A maior discrepância é verificada na estação CRSJ, justamente, onde não se impôs deslocamento vertical. Apesar desta estação apresentar a maior discrepância, nos testes estatísticos de deslocamento, não foi comprovado a existência de deslocamento significativo nesta estação. Esta estação está localizada no prédio do centro regional de São José dos Pinhais, em um pilar de centragem forçada, portanto, longe da proximidade de torres de alta-tensão e linhas de transmissão. Em todas as estações utilizou-se uma máscara de elevação de 15°, portanto, pode-se descartar a hipótese do efeito de multicaminho, bem como o da instabilidade do solo e do tripé, como causa da discrepância verificada na estação CRSJ. Deste modo, dentre os principais efeitos que causam degradação na precisão da componente altimétrica (h – Altitude Elipsoidal) do GPS (seção 2.1.3), pode-se atribuir, provavelmente, à discrepância apresentada na estação CRSJ, a configuração geométrica dos satélites e ao número de satélites envolvidos na época de coleta dos dados.

A estação TMA, é a estação que está localizada mais próxima dos circuitos da subestação, aproximadamente 15 m, apresenta a menor discrepância, não evidência, portanto, nenhum indício de interferência no sinal transmitido pelos satélites NAVSTAR/GPS e recebido pela antena do receptor GPS. A estação PHO (figura 3.4), localizada próxima a uma torre de alta-tensão, aproximadamente 2,5 m, devido a discrepância apresentada (-0,00988m), pouco evidencia a respeito da interferência do sinal transmitido pelos satélites NAVSTAR/GPS e recebido pela antena do receptor GPS. A instabilidade do solo e do tripé, que conduzem a erros no posicionamento, também, é pouco evidenciado nestas duas estações, uma vez que elas estão materializadas diretamente no solo. A estação CRCN, localizada sobre uma caixa d'água, em pilar de centragem forçada, envolta por grades de alumínio, teoricamente sujeita ao efeito multicaminho, também, pouco evidencia a respeito da interferência do sinal transmitido pelos satélites NAVSTAR/GPS e recebido pela antena do receptor GPS.

Em análise a tabela 6.21 e figura 6.3 e, comparando-as com a tabela 3.4 verifica-se que as magnitudes das discrepâncias variam com os comprimentos médios das linhas de base, ou seja, quanto maior o comprimento médio da linha de base, maior a discrepância. De outra maneira, poderia-se dizer, que quanto menor o comprimento médio da linha de base, maior a capacidade do GPS na detecção de deslocamentos verticais. Isto, também, pode ser verificado na figura 6.4, que indica a variação das discrepâncias (eixo das ordenadas), em módulo, em função do comprimento médio das linhas de base (eixo das abscissas).

FIGURA 6.4 – VARIAÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO MÉDIO DAS LINHAS DE BASE



Na sequência, será analisado o desempenho do GPS na detecção de deslocamento vertical nas estações BGI e CIC, as quais não receberam o mesmo tratamento.

6.3.2 ANÁLISE DE DESLOCAMENTO VERTICAL NAS ESTAÇÕES BGI E CIC

Após o processamento dos dados GPS das estações relativas BGI e CIC em função da estação PARA, nas duas épocas, foram obtidas suas coordenadas geodésicas. Estes valores, juntamente com seus respectivos desvios padrão, estão indicados na tabela 6.22.

TABELA 6.22 – COORDENADAS GEOGRÁFICAS ELIPSÓIDICAS DAS ESTAÇÕES BGI E CIC, REFERENTES A 1ª E A 2ª ÉPOCA

EST.	φ (S)	σ (")	λ (W)	σ (")	h (m)	σ (m)
1ª ÉPOCA						
BGI	25°28'47,15555"	0,0003	49°20'34,13190"	0,0004	912,7645	0,0095
CIC	25°31'35,74538"	0,0002	49°19'52,83117"	0,0003	895,5613	0,0101
2ª ÉPOCA						
BGI	25°28'47,15564"	0,0002	49°20'34,13216"	0,0002	912,7627	0,0045
CIC	25°31'35,74542"	0,0003	49°19'52,83072"	0,0003	895,4763	0,0032

Seguindo os mesmos passos da seção 6.3.1, transformou-se as altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas e, em seguida, tomou-se a diferença entre estas, de cada estação, obtidas nas duas épocas, como o deslocamento vertical ocorrido. As altitudes ortométricas de cada estação, referentes a 1ª e a 2ª época, com seu respectivo deslocamento estão indicadas na tabela 6.23

TABELA 6.23 – ALTITUDES ORTOMÉTRICAS E DESLOCAMENTO VERTICAL DAS ESTAÇÕES BGI E CIC OBTIDAS PELO GPS

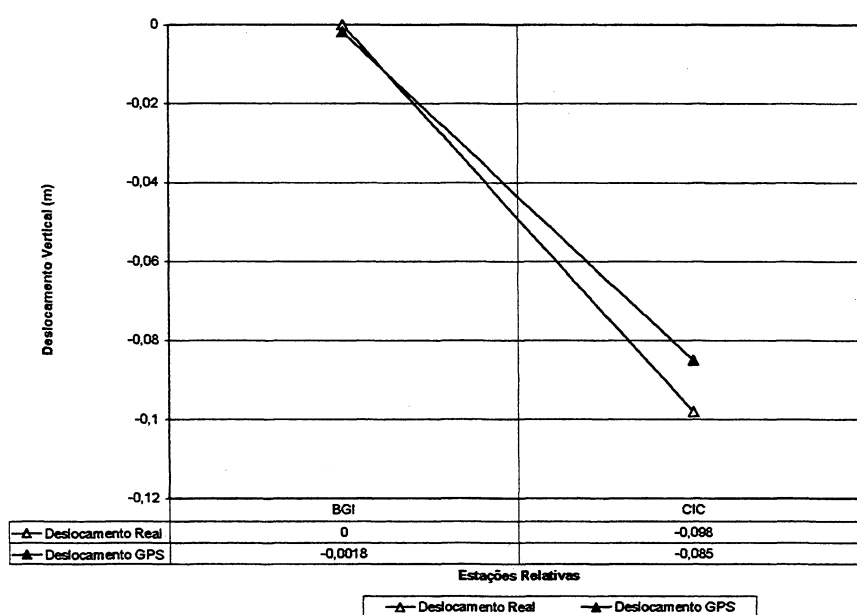
ESTAÇÃO RELATIVA	H (m) / 1ª ÉPOCA	H (m) / 2ª ÉPOCA	DESLOC. VERTICAL (m)
BGI	910,25450	910,25270	- 0,0018
CIC	893,10130	893,01630	- 0,0850

Novamente, confrontou-se os deslocamentos verticais impostos, aqui considerados como reais, com os obtidos por meio do GPS. Estes resultados encontram-se descritos na tabela 6.24 e estão representados graficamente na figura 6.5.

TABELA 6.24 – DISCREPÂNCIAS APRESENTADAS PELO GPS, REFERENTES AS ESTAÇÕES RELATIVAS BGI E CIC

ESTAÇÃO RELATIVA	DESLOC. REAL (m)	DESLOC. GPS (m)	DISCREPÂNCIAS (m)
BGI	0,00000	- 0,0018	- 0,0018
CIC	- 0,0980	- 0,0850	0,0130

FIGURA 6.5 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DESLOCAMENTOS REAL E GPS NAS ESTAÇÕES BGI E CIC

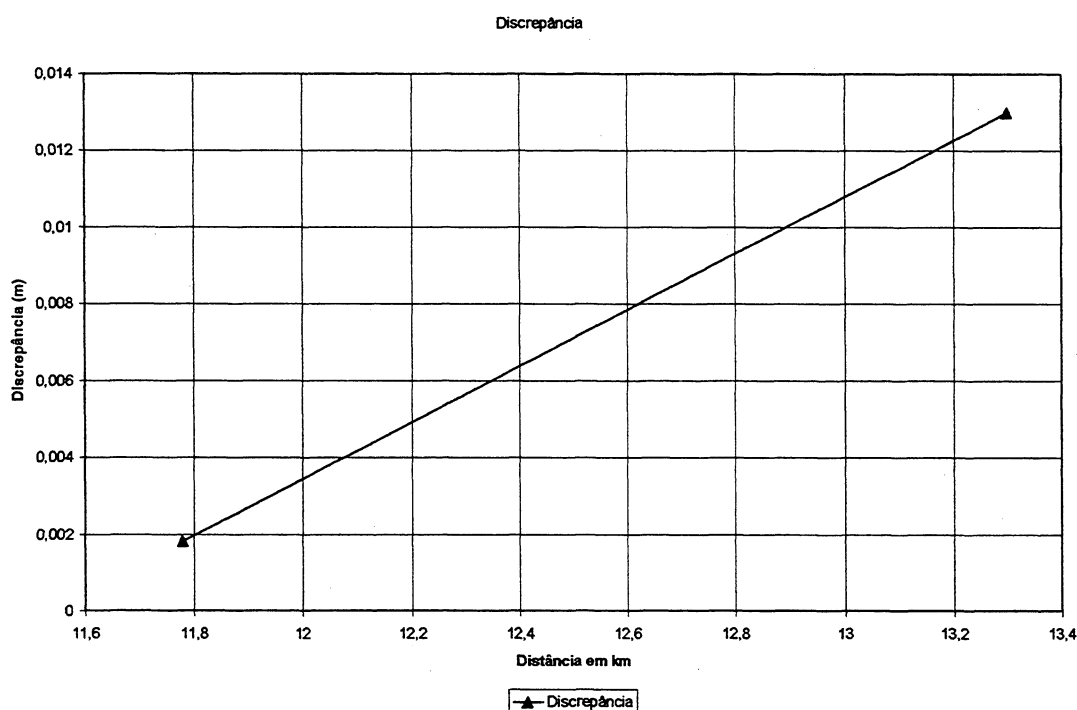


Por meio da análise da tabela 6.24, observa-se que a estação BGI (figura 3.2), materializada diretamente sobre o solo e próxima de circuitos e linhas de transmissão (teoricamente sujeita a instabilidade do solo e do tripé, bem como ao efeito multicaminho), na qual não se impôs deslocamento vertical, apresentou resultados satisfatórios quanto a repetibilidade da componente altimétrica (h), em duas épocas de observação, pois a diferença entre estas foi de $-1,8$ mm. Pode-se observar pela tabela 6.21, que resultados semelhantes ao da estação BGI, obteve-se para a estação TMA, na qual a discrepância foi de $1,49$ mm.

Observando-se a tabela 6.24 e a figura 6.5 e comparado-as com a tabela 3.4, verifica-se que as discrepâncias apresentadas pelas estações BGI e CIC,

seguiram o mesmo comportamento das apresentadas na seção 6.3.1, ou seja, quanto maior o comprimento da linha de base, maior a discrepância, consequentemente, quanto menor o comprimento da linha de base, maior a capacidade do GPS na detecção de deslocamentos verticais. Isto, também, pode ser verificado na figura 6.6, que mostra a variação das discrepâncias (eixo das ordenadas), em módulo, em função do comprimento das linhas de base (eixo das abscissas).

FIGURA 6.6 – VARIAÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DAS LINHAS DE BASE



Verifica-se, que mesmo sem passar pelos procedimentos de ajustamento e análises estatísticas, que as outras estações relativas foram submetidas, as estações BGI e CIC, apresentaram resultados satisfatórios na detecção de deslocamentos verticais. Provavelmente, este bom desempenho, está relacionado com os baixos desvios padrão das coordenadas cartesianas elipsóidicas, obtidas no pós-processamento das observações coletadas em campo. Estes valores podem ser vistos nos gráficos 4.6 e 4.7 (seção 4).

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa consistiu em apresentar e aplicar o critério de sensibilidade na análise de deslocamentos, bem como, o de verificar o desempenho do GPS na detecção de deslocamentos verticais. Tais objetivos foram alcançados por meio dos levantamentos realizados na Rede Geodésica GPS da COPEL.

No entanto, um fator preponderante para a consecução destes objetivos, foi o da utilização dos testes estatísticos para detecção de erros e de deslocamentos da rede. Inicialmente, utilizou-se o teste Global após os ajustamentos referentes as duas épocas, para verificar a compatibilidade do fator de variância a priori com o fator de variância a posteriori, a um nível de confiança de 95%. Mesmo com a aprovação de todos os ajustamentos, verificou-se resíduos de grandes magnitudes, os quais são gerados pela presença de erros embutidos em suas correspondentes observações. Desta forma, com objetivo de detectar observações com tais resíduos, utilizou-se o teste Data Snooping, a um nível de significância de 0,83%. Entretanto, este teste não detectou nenhum erro significativo nas observações.

Porém, com a utilização do teste de Confiabilidade, a um nível de confiança de 99,90% e poder de teste de 80%, foi possível a detecção e localização de erros embutidos nas observações, os quais não foram identificados pelo teste Data Snooping. Desta forma, verificou-se que as observações reprovadas neste teste, são as que apresentaram, em particular, a presença de resíduos de magnitudes consideráveis.

No que se refere as estatísticas empregadas na análise dos deslocamentos, o critério de sensibilidade mostrou-se eficaz na indicação de deslocamentos significativos. Aqui, é importante citar a estação CRSJ, na qual verifica-se diferenças de coordenadas entre duas épocas de observações, no

entanto, foi comprovado que estas diferenças não eram significativas. Na estação CRSJ, não se impôs deslocamento vertical. O posicionamento GPS nesta estação, em duas épocas de observação teve como objetivo principal, verificar a repetibilidade de medidas do GPS. Deste modo, destaca-se, então, a importância destas análises estatísticas, pois, se as mesmas não fossem realizadas, as diferenças de coordenadas verificadas na estação CRSJ, seriam consideradas como deslocamento. Fato similar ocorreu nas estações UBR e BTA, nas quais se impôs deslocamentos verticais, no entanto, nenhum deslocamento significativo foi comprovado. Entretanto, a análise dos deslocamentos estimados, nestas duas estações e, seus respectivos desvios padrão (tabela 6.13), foi primordial para a decisão de rejeição destas estações, uma vez que apresentavam desvios padrão maiores que os próprios deslocamentos estimados.

Analisando-se as tabelas de deslocamentos estimados (6.13), a estatística aplicada no processo de estimativa dos deslocamentos (6.15) e a estatística aplicada na análise de sensibilidade (6.16), verificou-se que quanto menor o desvio padrão do deslocamento estimado na estação, maior é a capacidade da estação em detectar deslocamento.

Após todas estas análises, realizou-se, finalmente, a análise dos deslocamentos verticais impostos nas estações relativas. Verificou-se, então, por meio das análises das tabelas 6.21 e 6.24, e comparando-as com a tabela 3.4, que quanto maior o comprimento da linha de base, maior a discrepância (diferença entre o deslocamento obtido pelo GPS e o deslocamento real) da estação envolvida, conseqüentemente, quanto menor o comprimento da linha de base, maior a capacidade do GPS na detecção de deslocamentos verticais.

Deste modo, pelo exposto acima e com base nos resultados obtidos, conclui-se que a aplicação do NAVSTAR-GPS com vistas a detecção de deslocamentos verticais mostrou-se promissora, mesmo com a rejeição de 5 estações, do total de 9 que passaram pelo processo de análises estatísticas.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Pode-se observar pela figura 6.4 que a variação das discrepâncias apresentadas pelo GPS em função do comprimento médio das linhas de base, é aproximadamente linear. Deste modo, recomenda-se:

- a realização de novos estudos, semelhantes a este, incrementando o número de estações, intercalando-as, por exemplo, a cada 5 km;
- processar os dados GPS com dupla frequência, utilizando softwares científicos;
- utilizar estações distantes de linhas de transmissão e circuitos elétricos; e
- aplicar outro método de análise de deslocamento.

Estas recomendações tem como objetivo verificar se a variação de discrepância em função do comprimento da linha de base é realmente linear, ou se ela segue outra tendência, como por exemplo, uma exponencial. Entende-se que esta linha de pesquisa, tem aplicação em projeto de sistemas de monitoramento de deformações, quando na tomada de decisão referente a custo-benefício.

REFERÊNCIAS

ASHTech Z-12™ GPS Receiver. **Operating Manual**. May 1994.

ASTERIADIS, G.; SCHWAN, H. (1998): GPS and Terrestrial Measurements for Detection Crustal Movements in a Seismic Area. **Survey Review**, vol.34, n.º 269, p.447-454.

BAARDA, W. (1968): **A Testing Procedure for Use in Geodetic in Networks**. Publications in Geodesy, News Series, 2(5), Netherlands Geodetic Commission.

CARVALHO, L. D. (1999): **Análise das Técnicas GPS Atuais para os Posicionamentos Estáticos e Cinemáticos em Bases Curtas**. Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 139p.

CHANG, C. C. (2000a): Estimates of Horizontal Displacements Associated with the 1999 Taiwan Earthquake. **Surveying Review**, vol. 35, n.º 275, p.563-568.

CHANG, C. C. (2000b): Estimation of Local Subsidence Using GPS and Leveling Data. **Surveying na Land Information Systems**, vol. 60, n.º 2, p.85-94.

CHRZANOWISKI, A. (1994): The Deformable World – Problems and Solutions. **Proceedings of The Deformation Measurements Workshop – Modern Methodology in Precise Enginnering and Deformation Surveys**. Ed. Bock, Y. Departament of Surveying EGINEERING, University of New Brunswick, Canada.

CHRZANOWISKI, A; CHEN, Y.; SECORD, J. M.; SZOSTAK-CHRZANOWISKI, A (1993): Problems and Solutions in the Integrated Monitoring and Analysis of Dam Deformations. **CISM Journal ACSGC**, vol. 45, n. 4, p. 547-560.

CHYZANOWISKI, A; CHEN, Y.; SECORD, J. M.; ROMERO, P. (1986): Integration of Geodetic and Geotechnical Deformation Surveys in the Geosciences. **Tectonophysics**, v. 130, n. 1-4, p. 369-383.

CONDIE, K. C. (1982): **Plate Tectonics & Crustal Evolution**. Pergamon Press

CROSILLA, F.; MARCHESINI, C. (1983): Geodetic Network Optimization for the Detection of Crustal Movements Using a Mekometer. **Bolletino di Geodesia e Scienze Afinni**, Firenze, v. 42, n.º 3, p.301-315.

CUNHA, M. J. P. (1997): **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global no Cadastramento de Redes de Distribuição Elétrica**. Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 104p.

CUNNINGHAM, J. P.; SWIFT, E. R.; MUELLER, F. (1999): **Improvement of the NIMA Precise Orbit and Clock Estimates**. Proc of ION GPS-99, Kansas City, MO, p. 1587-1596.

DE MORAES, C. V. (2001): **Aprimoramento da Concepção do Modelo Geodésico para a Caracterização de Estremas no Espaço Geométrico**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 277 p.

DOLAN, R.; GOODELL, H. G. (1986): Sinking Cities, **American Scientist**, vol. 74, January-February, p. 38-47.

EVEN-TZUR, G. (1999): Sensitivity Design for Monitoring Deformation Networks. **Bolletino di Geodesia e Scienze Afinni**, vol. 4, Ano LVIII, p.313-323.

GAGG, G. (1997): **Auscultação na Região da Barragem Bento Munhoz da Rocha**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 89p.

GEMAEL, C. (1994): **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas**. 1ª ed. Curitiba, PR.

GEMAEL, C.; FAGGION, P. L. (1996): Subsidência na Região de Grandes Barragens. **Revista Geofísica Brasileira**, vol. 14, n.º 3, p.281-285.

HOPFIELD, H. (1971): **Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: prediction from surface weather data**. Radio Science. 6. nº 3, p. 357-367.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1998): **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos**. 74 p.

IDEA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO AGROINDUSTRIAL LTDA (1996): **Introdução ao GPS**. Apostila de Curso. São Paulo.

KLOBUCHAR, J. A. (1986): **Design and Characteristics of the Ionospheric Time Delay Algorithm for Single Frequency Users**. In: PLANS-86 CONFERENCE. Las Vegas. Proceedings..., p. 280-286.

KRUEGER, C. P. (1996): **Investigações sobre Aplicações de Alta Precisão do GPS no Âmbito Marinho**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (UFPR), como requisito parcial à obtenção do grau de Doutora.

KUANG, S. (1996): **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and applications**. Chelsea: Ann Arbor Press.

LEICK, A. (1995): **GPS Satellite Surveying**. John Wiley & Sons, Inc: New York.

LIU, Q. (1998a): Recent Crustal Deformation Across the Datong-Yanggao (DTYG) Area, Inferred from the Terrestrial and GPS Measurements. **Bolletino de Geodesia e Scienze Affini**, Anno LVII, n.º 4, p.405-419.

LIU, Q. (1998b): Time-Dependent Models of Vertical Crustal Deformation from GPS – Leveling Data. **Surveying and Land Information Systems**, vol. 58, n.º 1, p.5-12.

MCDONALD, K. D. (1999): GPS Improvements in the Next Decade. **Newsletter of the Institute of Navigation**, v. 9, n.1, p. 5-9.

MIKHAIL, E. M. (1976): **Observations and Least Squares**. University Press of America, New York.

MONICO, J. F. G. (2000): **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS – descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP.

MÜRLE, M.; BILL, R. (1984): Zuverlässigkeits-und Genauigkeitsuntersuchung ebener geodätischer Netze. **Allgemeine Vermessungs-Nachrichten**, Karlsruhe, v. 89, n. 2, p. 45-62.

NIEMEIER, W.; HOLLMANN, R. (1984): Hauptkomponenten-und Sensitivitätsanalyse geodatischer Netze aufgezeigt am Überwachungsnetz "Varna". In: **Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover**, n.º 133.

PELZER, H. (1971): **Analyse Geodatischer Deformationsmessungen**. Deutsche Geos. Kom., Series C, N. 164, Munchen 1971.

PELZER, H.; HEER, R. (1996): Potential of the Global Positioning System (GPS) for Local Deformation Studies. 6 th. **International FIG-Symposium on Deformation Measurements**, Hannover.

RIZOS, A.; PAPO, H. B. (1989): **GPS Vertical Surveying: a discussion of some special considerations**. In: Bock, Leppard (eds.), p.272-281.

SAASTAMOINEN, J.J (1973): **Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction**. Bull. Geod. 107; p. 13-34.

SANTOS, M. C. (1994): **Analysis of Erros in GPS Orbit Determination**. Departament of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick. Fredericton, Nb., Canadá.

SANTOS, M. C. (1999): **Posicionamento por GPS**, curso promovido por GIS Brasil / 1999.

SAVVAIDS, P.; MARTINOD, J.; KATSAMBALOS, K.; HATZFELD, D.; BADELLAS, A. (1997): Determination of Ground Displacements in the Seismic Zone of Volvi, Greece. **Survey Review**, vol. 34, n.º 266, p.229-236.

SCHMIDT, H. (1997): Was ist Genauigkeit? – Zum Einfluss Systematischer Abweichung auf Mess-und Ausgleichungsergebnisse – **Vermessungswesesn und Raumordnung**. Bonn, v. 59, n. 4, p. 212-228.

SECORD, J. (1985): **Implementation of a Generalized Method**, Departament of Surveying Engineering Technical Report N. 117, University Of New Brunswick, N.B., Canada, 221 p.

SEEBER, G. (1993): **Satellite Geodesy: foundations, methods and aplications**. Walter de Gruyter: Berlin; New York: Walter de Gruyter.

SEGANTINE, P. C. L. (1996): **Curso de Atualização em Topografia e GPS (Segundo a Norma NBR 13.133)**. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP. 195 p.

SILVA, M. C. D. (1986): **Aplicação da Mecânica dos Corpos Deformáveis á Análise de Consistência de Observações em Redes Geodésicas Horizontais**. Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

TEIXEIRA, N. T.; FERREIRA, L. D. .D (2001): **Análise de Deslocamento Vertical Utilizando o GPS**. In: **II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Curitiba, PR. No prelo.

VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. (1986): **Geodesy: The Concepts**. Second edition. North – Holland Publishing Company.

WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLU, D.; KLEUSBERG, A; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANICEK, P. (1986): **Guide to GPS Positioning**. Fredericton, New Brunswick, Canada: Canadian GPS Associates.

XAVIER, J. H. (2000): **Análise de Estabilidade de uma Rede Local GPS Situada no Litoral Paranaense**, Dissertação de mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 111p.

DOCUMENTOS CONSULTADOS

BIACS, Z. F.; TESKEY, W. F. (1990): Deformation Analysis of Survey Networks with Interactive Hypothesis Testing and Computer Graphics. **CISM Journal ACSGC**, v. 44, n. 4, p. 403-416.

CASPARY, W. F. (1987): **Concepts of Network and Deformation Analysis**. Monograph 11, Scholl of Surveying, The University of New South Wales, Austrália.

CHATFIELD, C.; COLLINS, A. J. (1980): **Introduction to Multivariate Analysis**. (reimpressão de 1996). London: Chapman & Hall.

CHEN, Y. Q. (1983): Analysis of Deformation Surveys, a Generalized Method. **Departament of Surveying Engineering Technical Report**, n.º 94, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada.

FERREIRA, L. D. D.; GARNÉS, S. J. (2000): Análise da Deformação de Estrutura de Redes Geodésicas Horizontais. **Cobrac 2000**, Florianópolis, Anais (CD).

HOFMAMM – WELLNHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (1994): **GPS: Theory and Practice**. 3ª edição revisada. New York: Springer – Verlag Wien.

HUDNUT, K. W.; KING, N. E.; BEHR, J. A. (1998): Monitoring Structural Deformation at Pacoima Dam, Califórnia Using Continuous GPS. **Seismological Research Letters**, vol. 69, n.º 4, p.299-309.

KUANG, S. (1991): **Optimization na design of deformation monitoring schemes**, Ph. D. Dissertation, Departament of Surveying Engineering Technical Report N. 157, University Of New Brunswick, N.B., Canada.

LAZZARINI, T. (1975): **The Identification of Reference Points in Trigonometrical and Linear Networks Established for Cheking Structures**. Proceedings. Of the 1st FIG International Symposium on Deformation Measurements by Geodetic Methods, Fig. Krakow. P. 302-314.

LIU, Q. W.; CHEN, Y. Q.; LI, Y. X. (2000): The Estimation of Crustal Deformation in The Shanxi Area, China from the 1996 and 1997 GPS Observations. **Survey Review**, vol. 35, n.º 275, p.349-355.

PELZER, H. (1974): **Neure Ergebnisze bei der Statistischen Analyse von Deformationsmessungen**. Preceedings of the FIG XIV International Congress, Washington, paper n. 608.3.

SANTOS, M. C. (1999): **Estabilidade das Estruturas Geodésicas**, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, PR, 74p.

SKOLNIKOF, I. S. (1956): **Mathematical Theory of Elasticity**. McGraw-Hill, New York.

TEIXEIRA, N. T. (2001): **Detecção e Análise de Deslocamento Vertical em Redes Geodésicas Utilizando o Sistema NAVSTAR-GPS**. Seminário de Qualificação, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas/UFPR, Curitiba, p. 57.

VALBUNA, J. L. (2000): **Sobre a Utilización de Técnicas Distanciometricas para el Control de Deformaciones em Grandes Estructuras**. Instituto de Astronomia Y Geodesia, Madrid/Espanha. 11 p.